

Титан.

**Свойства, применение, производство,
конечная продукция и ее применение**

Подготовили: Никонов Н.В., Чапала Ю.И.

Верстка: Горелик Н.Е.



Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5	3.1.3.3.2. Получение тетрахлорида титана (TiCl ₄) хлорированием TiO ₂	35
ГЛАВА 1. СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНА.....	5	3.1.3.3.2.1. Хлорирование в шахтных хлораторах	35
1.1. МАРКИ ТИТАНА И СПЛАВОВ	5	3.1.3.3.2.2. Хлорирование в расплаве солей	37
ГЛАВА 2. ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНА	17	3.1.3.3.3. Металлотермическое восстановление Ti из TiCl ₄ при помощи Mg и Na ..	38
2.1. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА.....	17	3.1.3.3.3.1. Восстановление магнием (магниетермия)	38
2.1.1. Получение титанового концентрата.....	17	3.1.3.3.3.2. Восстановление натрием (натриетермия)	40
2.1.2. Производство металлического титана	18	3.1.3.3.3.3. Сравнение магниетермического и натриетермического способов восстановления Ti из TiCl ₄	40
2.1.3. Восстановление четыреххлористого титана	19	3.1.3.4. Получение высокочистых порошков Ti электролитическим разложением тетрафторида TiF ₄	41
2.1.4. Восстановление двуокиси титана.....	20	3.1.3.4.1. Общее описание техпроцесса	41
2.1.5. Термическая диссоциация иодида титана	20	3.1.3.4.2. Преимущества метода	43
2.2. ПРОИЗВОДСТВО КОМПАКТНОГО ТИТАНА	21	3.1.3.5. Получение высокочистого Ti методом электротермического йодидного рафинирования титанового сырья, загрязненного примесями	43
2.2.1. Плавка.....	21	3.1.4. Практическое применение титановых порошков	45
2.2.2. Методы порошковой металлургии	23	3.1.5. Порошки титана в аддитивных технологиях (3D печать).....	48
2.2.3. Прокатка в оболочке	25	3.1.5.1. Сущность и преимущества аддитивных технологий.....	48
ГЛАВА 3. ПОЛУФАБРИКАТЫ ИЗ ТИТАНА.....	26	3.1.5.2. Значение титановых порошков для аддитивных технологий	48
3.1. ТИТАНОВЫЕ ПОРОШКИ	26	3.1.5.3. 3D-принтеры и основные способы 3D-печати	49
3.1.1. Общее описание	26	3.1.5.3.1. Метод SLS	49
3.1.2. Основные стандарты, марки, требования к качеству	26	3.1.5.3.2. Метод EBM	50
3.1.2.1. ТУ1791-449-05785388-2010 «Титан пористый, порошок. Технические условия»	27	3.1.5.4. Сферы применения порошков титана в аддитивных технологиях.....	52
3.1.2.2. ТУ 14-22-57-92 «Порошок титановый»	27	3.2. ТИТАНОВЫЕ ПРУТКИ/КРУГИ.....	53
3.1.2.3. ТУ 48-10-78-83 с 7 изменениями «Порошок титановый химический»	28	3.2.1. Общее описание, габариты, определяющие характеристики	53
3.1.2.4. ТУ 48-10-22-85 «Порошок титановый электролитический. Технические условия»	29	3.2.2. Регламентирующие промышленные стандарты.....	53
3.1.3. Производственные технологии	30	3.2.3. Марки, химический состав, требования к качеству, цветовая маркировка	54
3.1.3.1. Механический способ изготовления порошков из пористого Ti (ТПП)	30	3.2.3.1. Марки, химический состав.....	54
3.1.3.2. Восстановление диоксида титана гидридом кальция	31	3.2.3.2. Цветомаркировка	55
3.1.3.3. Метод металлотермического восстановления титановых порошков из тетрахлорида титана (TiCl ₄).....	33	3.2.4. Преимущества и недостатки.....	56
3.1.3.3.1. Восстановительная плавка ильменитового концентрата.....	34	3.2.5. Производственные технологии	56
		3.2.5.1. Производство катаных титановых прутков.....	56
		3.2.5.1.1. Метод продольной прокатки.....	58

3.2.5.1.2. Поперечная прокатка	58
3.2.5.1.3. Поперечно-винтовая (косая) прокатка.....	59
3.2.5.2. Прутки титановые кованные	60
3.2.5.2.1. Радиальная ковка	60
3.2.5.2.2. Ротационная ковка	62
3.2.6. Сфера практического применения	63
3.3. ТИТАНОВЫЕ ЛИСТЫ И ПЛИТЫ	64
3.3.1. Общее определение, габариты, свойства.....	64
3.3.1.1. Габариты.....	64
3.3.1.2. Важнейшие потребительские свойства	65
3.3.2. Регламентирующие промышленные стандарты.....	66
3.3.3. Марки, химсостав, требования к качеству.....	66
3.3.4. Производственные технологии	68
3.3.4.1. Холодная прокатка титановых листов.....	68
3.3.4.2. Горячая прокатка титановых листов.....	70
3.3.4.3. Прокатка титановых плит	71
3.3.5. Сфера практического применения	72
3.4. ТИТАНОВАЯ ЛЕНТА И ФОЛЬГА	73
3.4.1. Общее определение, габариты, свойства	73
3.4.1.2. Свойства и характеристики	74
3.4.2. Регламентирующие промышленные стандарты.....	74
3.4.4. Производственные технологии	76
3.4.5. Практическое применение	78
3.5. ТИТАНОВАЯ ПРОВОЛОКА И НИТЬ.....	79
3.5.1. Общее определение, габариты, свойства	79
3.5.1.1. Габариты.....	80
3.5.1.2. Основные эксплуатационные свойства	80
3.5.2. Регламентирующие промышленные стандарты.....	80
3.5.3. Марки и химсостав, требования к качеству.....	81
3.5.4. Производственные технологии	81
3.5.4.1. Сущность технологии протяжки	81

3.5.4.2. Этапы процесса	83
3.5.4.3. Оборудование для волочения	84
3.5.5. Изготовление проволоки и нити из никелида титана	84
3.5.5.1. Инфракрасный нагрев проволоки из нитинола перед волочением и его преимущества.....	86
3.5.6. Сфера практического применения	87
3.6. ТИТАНОВЫЕ ТРУБЫ.....	88
3.6.1. Общее определение, габариты, свойства	88
3.6.1.1. Габариты.....	88
3.6.1.2. Основные потребительские свойства	89
3.6.2. Регламентирующие промышленные стандарты.....	90
3.6.3. Марки, химсостав, требования к качеству.....	90
3.6.4. Производственные технологии	91
3.6.4.1. Производство бесшовных труб холодной деформации	91
3.6.4.2. Производство горячекатаных титановых труб	93
3.6.4.3. Производство сварных титановых труб	94
3.6.5. Практическое применение	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96

В статье «Титан. Свойства, применение, производство, продукция» подробно рассматривается металл титан. Описаны его свойства, указаны области применения. Также перечислены различные марки титан с указанием их особенностей.

Статья освещает процесс производства Ti от стадии обогащения руды до стадии получения заготовок в виде штабиков и слитков. Отмечаются характерные особенности каждой стадии.

Особое внимание в статье уделяется продукции (круглый прокат - проволока, прутки, трубы; плоский прокат - листы, плиты,

ленты, фольга; порошок и др.). Описаны процессы изготовления той или иной продукции из титана, ее характерные особенности и области применения.

Статья содержит ссылки на стандарты, такие как ГОСТ, ОСТ и ТУ, на другие статьи, описывающие смежные темы.

ГЛАВА 1. СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНА

1.1. МАРКИ ТИТАНА И СПЛАВОВ

Технический титан

Технический титан производится в виде губки - пористого вещества с насыпной массой 1,5-2,0 г/см³ и очень высокой вязкостью. В зависимости от количества примесей он поставляется под маркировкой BT1-00 или BT1-0. Первая марка содержит в своем составе 99,58-99,90% Ti, вторая - 99,24-99,70%.

Сплавы титана

В настоящее время известно довольно большое число серийных титановых сплавов, отличающихся по химическому составу, механическим и технологическим свойствам. Наиболее распространенными легирующими элемен-

тами являются алюминий, ванадий, молибден, марганец, хром, кремний, олово, цирконий, железо.

Титановый сплав BT5 содержит помимо Ti 5% алюминия (Al). Он отличается более высокими прочностными свойствами по сравнению с титаном, но его технологичность невелика. Сплав куется, прокатывается, штампуется и хорошо сваривается. Из марки BT5 получают титановые прутки (круги), проволоку и трубы. Его применяют при изготовлении деталей, работающих при температуре до 400 °С.

Сплав титана BT5-1 помимо 5% алюминия содержит 2-3% олова (Sn). Оно

улучшает технологические свойства материала. Из BT5-1 изготавливают все виды полуфабрикатов, получаемых обработкой давлением: титановые листы и плиты, поковки, штамповки, профили, титановые трубы и проволоку. Он предназначен для изготовления изделий, работающих в широком интервале температур: от криогенных до 450 °С.

Титановые сплавы OT4 и OT4-1 помимо Ti содержат Al и Mn. Они обладают высокой технологической пластичностью (хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии) и хорошо свариваются всеми видами сварки. Титан данных марок идет в основном на изготовление плит, листов, лент и полос, а также производятся титановые круги и прутки, поковки, профили и титановые трубы. Из марок OT4 и OT4-1 изготавливают с применением сварки, штамповки и гибки детали, работающие до температуры 350 °С. Данные сплавы имеют недостатки: 1) сравнительно невысокая механическая прочность и жаропрочность; 2) большая склонность к водородной хрупкости. В марке *ПТЗВ* марганец заменяется на ванадий (V).

Титановый сплав BT20 разрабатывали как более прочный материал по сравнению с BT5-1 для производства листов. Его упрочнение обусловлено легированием, помимо алюминия, цирконием (Zr) и небольшими количествами молибдена и ванадия. Технологическая пластичность марки BT20 невысока из-за большого содержания алюминия. Титан

BT20 отличается высокой жаропрочностью. Он хорошо сваривается, прочность сварного соединения равна прочности основного металла. Сплав предназначен для изготовления изделий, работающих длительное время при температурах до 500 °С.

Титан BT3-1 относится к системе Ti - Al - Cr - Mo - Fe - Si. Он обычно подвергается изотермическому отжигу, который обеспечивает наиболее высокую термическую стабильность и максимальную пластичность. Материал относится к числу наиболее освоенных в производстве. Он предназначен для длительной работы при 400 - 450 °С; это жаропрочный сплав с довольно высокой длительной прочностью. Из него поставляют титановые прутки/круги, профили, титановые плиты, поковки, штамповки.

§3 Применение титана и сплавов

Титан в металлургии называют металлом будущего. Такую популярность он приобрел благодаря своим уникальным качествам. Металл является отличным орудием труда для людей, принимающих инновационные решения все в тех или иных сферах промышленности.

Первыми использовать титан и его сплавы начали в производстве военной техники. Прошли годы, десятилетия, и сегодня его активно применяют в судостроении, химической промышленности, медицине, авиационной и многих других сферах.

Авиастроение

В современном мире авиационная промышленность является лидером по оборотам использования титанового сырья. Ни в одной сфере промышленности металл не используется в таких масштабах, как в авиастроении. Инновации в этом направлении способствовали «размаху» производства титановых сплавов. Почему именно титан является ведущим сырьем в авиастроении? Дело в том, что физические и химические свойства данного металла являются наиболее подходящими для авиаконструкций.

До второй половины прошлого столетия титан использовался в основном для производства газовых турбин двигателей самолетов. Он являлся оптимальным сырьем для изготовления этих изделий, поскольку отличается повышенной прочностью. В 70-80-е годы сплавы с добавлением данного металла стали с успехом использоваться в производстве

разных элементов (деталей) планерной части самолетов. Дело в том, что титан является одновременно прочным и легким по весу сырьем. Изготовленные из него детали весили намного меньше своих стальных аналогов.

В современной авиации титан применяется в качестве материала для обшивки самолетов. Из него же изготавливают те элементы конструкций, которые более всего подвержены нагреву. Силовые детали и части шасси также производятся из титана. Он является основным сырьем для изготовления таких элементов двигателей самолетов, как:

- Лопатки;
- Диски;
- Детали вентилятора;
- Компрессор.



Рисунок 1. Титан в авиации.

Для производства одного самолета может быть использовано свыше 20 тонн

данного металла. К примеру, известный Боинг-787 содержит в себе примерно 2,5

миллионов заклепок из титана. Благодаря этому общий вес авиаконструкции снижается на несколько тонн (если сравнить их со стальными вариантами).

Что еще «готовят» из титановых сплавов в авиационной промышленности? Из них производят:

- Окантовку люков и дверей. Дело в том, что это те области авиаконструкций, в которых происходит накопление влаги. Благодаря антикоррозионной стойкости титана изготовленные из него дверные окантовки имеют долгий срок службы;

- Обшивку, которая регулярно испытывает на себе неблагоприятное воздействие продуктов сгорания двигателя самолета;

- Противопожарные перегородки;
- Тонкостенные трубопроводы воздушной системы. Титан является наиболее стойким к высоким температурам металлом;

- Настил пола грузовой кабины. Здесь данный металл широко применяется из-за своей высокой прочности и твердости;

- Стойки шасси;
- Кронштейны крыла;
- Гидроцилиндры;
- Диски и лопатки вентиляторов и компрессоров;
- Корпуса двигателей.

Можно с уверенностью сказать, что на сегодняшний день на территории России и стран Содружества не имеется ни одной авиаконструкции, для изготовления которой не был бы использован титан.

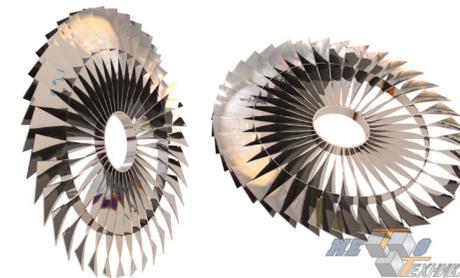


Рисунок 2. Титановые лопатки

Ракетостроение и космическая техника

Незаменимым сырьем считается титан в области ракетостроения и производстве космической техники. Чем обусловлено такое мнение? В первую очередь, спецификой космоса. Он является глубоким ледяным вакуумом. Любой неодушевленный предмет, попадая в его пространство, начинает остывать под воздействием неимоверного холода, царящего в космосе. Представьте, какое воздействие испытывает на себе космическая техника. На нее действуют и высокие температуры солнечных лучей и атаки космических частиц, движущихся молниеносно. Корабль на просторах космоса испытывает на себе все «прелести» радиации. Такую нагрузку могут выдержать лишь очень прочные металлы, среди которых – титан. Сплавы с его добавлением применялись в производстве

ряда ракетных комплексов («Марс», «Луна», «Венера» и др).



Рисунок 3. Титан в Ракетостроении

Судостроение

Активно используется титан в судостроении. Он является часто применяемым материалом для обшивки судов. Из него изготавливают элементы насосов и трубопроводов.

Главным достоинство данного металла для сферы судостроения является его незначительная плотность. Изготовленные с применением титана морские корабли весят сравнительно мало, при этом легко маневрируют. У титановой судовой техники лучшая дальность хода. Поскольку данный металл стоек к влаге и коррозии, обшивка суда из него никогда не помешает свой внешний вид и не будет нуждаться в покраске. Изготовленные из титановых сплавов детали морских судов

долговечны даже при управлении техникой на больших скоростях. Поскольку магнитные способности у данного металла слабо выражены, целесообразно его применение в производстве навигационных приборов. «Мечтой» инженеров судостроения является разработка и создание на основе титана немагнитной морской техники. Такие корабли, по их мнению, дадут большой толчок геологогеофизическим исследованиям на просторах океанов. До сих пор препятствием являлось воздействие металлических деталей судов на высокоточные устройства навигации.

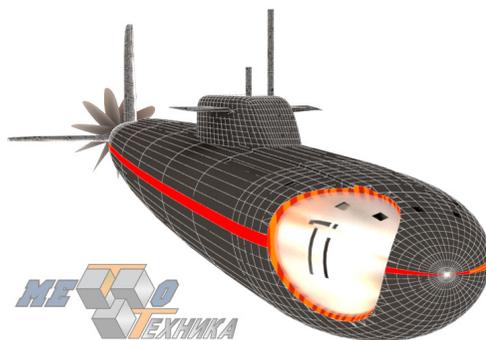


Рисунок 4. Титан в судостроении

Не менее широко применяется титан в качестве сырья для изготовления конденсаторных труб, двигателей турбин и паровых котлов. Поскольку данный металл стоек к коррозии, влаге, высоким и низким температурам, его активно используют в производстве глубоководного оборудования.



Рисунок 5. Конденсаторные трубы из титана

Машиностроение

Титановые сплавы широко применяются в производстве теплообменного оборудования, которое так необходимо для энергетической, химической и нефтехимической направлений промышленности. В частности, из этого металла изготавливают трубы для теплообменных агрегатов и конденсаторы турбин. Применение сплавов обеспечивает им долгий срок эксплуатационной службы. Соответственно, достигается

ощутимая экономия денежных затрат на проведение ремонтных работ.



Рисунок 6. Титановые трубы для теплообменных агрегатов

Сплавы этого металла обладают антикоррозийной защитой. В этом отношении они превосходят другие сплавы в десятки раз. Стойкость к коррозии позволяет изготавливать титановые трубы с более тонкими стенками. В таких конструкциях лучше проходят потоки тепла. Титан с успехом используют в тепловой и атомной энергетической промышленности во всем мире.

Нефтегазовая промышленность

Применение титановых сплавов целесообразно везде, на земле и под землей, при освоении морских и космических пространств. Большие надежды связывают ученые-инженеры с их использованием при бурении скважин. Богатства земли невозможно добыть, не приложив значительного труда. Иногда для этого необходимо проникнуть на 10-20 километров в глубину земли. Поскольку обычные трубы, применяемые для бурения, не выдерживают такой нагрузки,

приходится искать варианты решения данной проблемы. По мнению специалистов, именно титановые трубы в силу своей прочности способны осилить погружение в земную кору на такую большую глубину. Использование конструкций из титана позволяет значительно увеличить интенсивность добычи и объемы извлекаемых богатств, содержащихся в недрах земли. В современном мире титановые сплавы широко применяются в производстве агрегатов, целевое назначение которых – эффективное освоение месторождений нефти и газа. В частности, из них изготавливают:

- Глубоководные бурильные установки;
- Добывающие установки;
- Насосы;
- Трубопроводы;
- Теплообменные конструкции и агрегаты;
- Сосуды высокого давления и др.

Специалисты считают: необходимо всячески стремиться к тому, чтобы подавляющее большинство глубоководного оборудования, применяемого при добыче нефти и газа, производилось именно из сплавов данного металла. Свое мнение они аргументируют наличием у титана таких свойств, как стойкость к образованию коррозии в условиях долгого пребывания в морской воде. Потому долговечными в работе будут следующие конструкции, изготовленные из него:

- Трубы;
- Отводы;
- Фланцы;
- Тройники;
- Переходы для систем забортной и балластной воды.



Рисунок 7. Титановые отводы и тройники

Автомобильная промышленность

Сегодня инженеры автопрома прилагают все усилия к тому, чтобы максимально снизить массу запчастей и деталей, из которых, собственно, и собирают автомобили. Почему так важно уменьшение данного параметра? Чем ниже масса авто, тем легче ему передвигаться и маневрировать. К тому же, снижение массы автомобиля значительно снижает расход горючего и количество выделяемых им выхлопных газов. Последнее весьма актуально для городов-миллионников с плохой экологией.

Какие именно детали современных автомобилей производятся из титановых сплавов?

Это:

- Клапаны;
- Пружины;
- Выхлопные системы;
- Передаточные валы;
- Болты.



Рисунок 8. Титановые болты

В ходе скоростных испытаний была выявлена прочность титановых элементов. О надежности конструкций, изготовленных из данного металла, свидетельствует и большой опыт его использования в авиации и производстве космической техники.

Строительство

Уникальные свойства титана позволяют применять его как строительное сырье. Его антикоррозионные качества,

незначительный вес и высокая прочность повышают срок службы изделий, изготовленных с его добавлением. А это значит, что в ходе эксплуатации строительных материалов не придется периодически проводить ремонт, затрачивая при этом дополнительные денежные средства. Пожалуй, нет на свете более выигрышного варианта для применения в строительстве, чем использование титановых изделий.



Рисунок 9. Титановые листы и плиты

Почему так? Известно, что оптимальными для возведения жилых и нежилых строений зданий являются те материалы, которые способны выдерживать механические и климатические нагрузки. На качественное строительное сырье не оказывает влияние воздействие дождевой и талой влаги, снеговых залежей, промышленных выбросов, ярких лучей солнца, сильных ветров (ураганов), града, и многих других явлений внешней среды. Естественно, материал должен быть устойчивым к появлению ржавчины. Поскольку титановые сплавы обладают всеми вышеперечисленными

качествами, он является «лакомым кусочком» в строительной сфере. Особенно актуально его применение при возведении жилых и нежилых объектов в городах-миллионниках с низким уровнем экологии.

Данный металл широко используется в качестве отделочного (облицовочного) сырья для наружной и внутренней обшивки строений, колонн и карнизов, а также в производстве материалов для кровли.

Медицина

Одно из лидирующих мест по спросу на титановые сплавы занимает медицина. Сверхпрочный металл ценят практически во всех направлениях данной сферы: в ортопедии, кардиологии, стоматологии, нейрохирургии. Такой интерес к нему неудивителен. Самые прочные хирургические инструменты производятся именно с добавлением данного сырья.

Не секрет, что современное общество ведет активный во всех отношениях образ жизни. Естественно, это не может не сказываться на человеческом организме. Распространенной проблемой сегодня являются переломы, ушибы, трещины и другие повреждения открытого и закрытого типа. Случиться такое может и в процессе спортивных тренировок, и в результате аварии, и как результат чрезвычайных происшествий. Для ликвидации последствий таких несчастных случаев нужно не только оказание медицинской помощи, но и ношение специальных ортопедических

конструкций и имплантов. Огромное преимущество титана перед рядом других металлов заключается в том, что он способен в короткие сроки вживляться в человеческий организм. Самое главное – что титановые импланты и протезы способны не только быстро «прорастать» с тканями в теле человека, но и не вызывают никаких побочных эффектов. К применению данных конструкций нет противопоказаний (в силу их безопасности для костной и мышечной систем организма). Они гипоаллергенны и не подвержены распаду. На них не оказывают влияния ни жидкости в организме, ни мягкие и твердые ткани, ни лекарственные средства, употребляемые человеком. Титановые ортопедические конструкции в силу своей прочности и надежности имеют внушительный срок службы. В этом отношении они превосходят алюминиевые и железные аналоги в несколько раз.

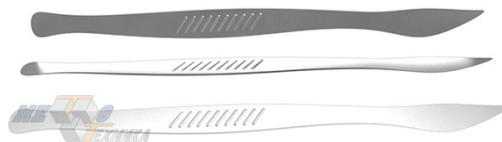


Рисунок 10. Титановый нож-шпатель

С успехом применяется титан и в стоматологии. Из него изготавливают столь популярные сегодня имплантанты. Данные конструкции способны вживляться в челюсть, таким образом создавая на ранее пустующем месте основу для наращивания верхней части зуба.



Рисунок 11. Титановый зубной имплант

А благодаря применению титановых протезов, имитирующих внутриушные косточки, стало возможным вернуть слух! Для кардиологов титан важен как материал, из которого изготавливаются корпусные части электронных стимуляторов сердца и дефибрилляторов.

Уникальное качество данного металла, которое важно с точки зрения медицины, – это его немагнитность. Благодаря этому пациентам, носящим титановые протезы, можно без всяких опасений проводить физиотерапевтические процедуры с использованием магнитных и электротоковых медицинских аппаратов.

Спорт

Не менее, чем в других сферах, популярны титановые сплавы в спорте. Ме-

талл успешно применяют в производстве спортивных приспособлений и оборудования. Широкий спрос на него обусловлен его низкой массой и сверхпрочностью.

Не секрет, что несколько десятков лет назад мир увидел уникальное по тем временам изобретение – велосипед. Именно тогда титан был впервые использован в качестве основного материала спортивного инвентаря. Но если в то время титановыми были корпуса велосипедов, то современные модели украшают тормоза и пружины сидения из данного металла.



Рисунок 12. Титановая велосипедная рама

Япония стала новатором в использовании титановых сплавов. В этой стране из них изготавливают клюшки для гольфа. Одновременно легкие и прочные, они отлично помогают справиться спортсмену с целью – попасть в лунку. Хотя такие клюшки имеют существенную

стоимость. Титановые мячики для гольфа обойдутся также дороже обычных.

Мало кто знает, но многие приспособления альпинистов и туристов часто выполняют из титана. Даже посуда. Это, в принципе, понятно. Прочные чашки и тарелки не разобьются в походных условиях. Переносные печи, ледорубы, стойки для палаток – все это изготавливается из титана.



Рисунок 13. Титановые часы

Удивительно, но именно применение титана делает мелодичным и столь приятным на слух звон колокольчиков, используемых для привычных нам электрозвонков.

Химическая промышленность

Титан – это не только сверхпрочный металл. Это еще и химическое вещество, которое активно проявляет уникальные свойства в составе различных соединений. В химической промышленности наиболее часто применяется диоксид титана. Такой спрос на него обусловлен его экологической безопасностью. Данное соединение не выделяет токсинов и не представляет опасности для здоровья человека.

В основном диоксид титана применяется в химической промышленности для

производства лакокрасочной продукции. Он представляет из себя белый порошок.

Пищевая промышленность

С применением титана не только строят дома, морские и космические корабли, но даже используют в пищевой промышленности. Каким образом? Вы когда-нибудь обращали внимание на состав конфет, указываемый на фантиках? Нередко среди ингредиентов можно обнаружить вещество E171, под которым подразумевается ни что иное, как краситель из диоксида титана. Им окрашивают жевательные резинки, кондитерские изделия, крабовые палочки, блюда из фарша и многое другое.

Таблица 1. Свойства диоксида титана

Общие свойства	
Систематическое название	диоксид титана
Хим. формула	TiO ₂
Физические свойства	
Состояние	твёрдое
Молярная масса	79,866 г/моль
Плотность	(P) 4,235 г/см ³
	(A) 4,050 г/см ³
	(Б) 4,100 г/см ³
Термические свойства	
Т. плав.	1843 °C
Т. кип.	2972 °C
Т. разл.	2900 °C



Рисунок 14. Диоксид титана

Другие области применения

Диоксид титана активно используется в производстве лекарственных препаратов как окрашивающее вещество. А в бьюти-индустрии с его добавлением создаются кремы, гели, шампуни и многие другие средства по уходу за кожей и волосами. Диоксид титана применяется также в производстве зубных паст. Для чего? В целях повышения отбеливающего эффекта этого средства гигиены зубов.

Из диоксида титана изготавливают резину, пластмассу, тугоплавкие стекла и даже драгоценные камни.

Из всего вышесказанного следует, что нельзя недооценивать несомненную пользу титана и его сплавов. Современный человек использует массу предметов и вещей, в составе которых находится этот металл.

2.1. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА

Процесс получения металлического титана осуществляется в несколько стадий:

- добыча руды;
- ее обогащение и получение концентрата;
- восстановление чистого металлического титана.

2.1.1. Получение титанового концентрата

Титан в том или ином виде содержится во многих природных минералах. Однако для промышленного применения пригодны далеко не все из них. Содержание Ti в рудах должно быть достаточным, а процесс извлечения металла не должен представлять чрезмерных трудностей.

Среди минералов, пригодных для промышленного получения металла, стоит выделить следующие:

- ильменит - содержит до 36% Ti;
 - рутил - самый богатый титаном минерал (до 60% Ti);
 - титаномагнетиты;
 - лопариты;
 - титанит (сфен);
 - перовскит.
- из концентрата оксид железа Fe_3O_4 . Если титаномагнетит представлен в виде

твердого раствора Fe_3O_4 и $FeO \cdot TiO_2$, то для его обогащения применяется металлургический передел, а именно плавка. В основе этого способа лежит различная восстанавливаемость углеродом (C) оксидов железа и титана. Условия протекания процесса и состав шихты подбираются таким образом, чтобы в результате железо было восстановлено, а соединение титана осталось в концентрате. С помощью такого передела обогащается также ильменит.

Еще одним способом отделения железа (Fe) от титана (Ti) является дробное хлорирование. Условия процесса (как правило, температура) подбираются таким образом, чтобы с хлором (Cl) взаимодействовало только железо (Fe), а двуокись титана находилась в остатке.

Флотация и мокрое обогащение по удельному весу применяются для обработки руд россыпных месторождений, в том числе для отделения ильменита от пустой породы.

Комплексные титановые руды (содержат в своем составе несколько металлов) сложнее всего поддаются обогащению. В зависимости от их состава технология обработки в каждом конкретном случае выбирается индивидуально.

Для получения TiO_2 из богатых руд хорошо зарекомендовал себя метод сер-

нокислого разложения. Его суть заключается в обработке минералов серной кислотой при нагревании. В результате Fe удаляется из концентрата в виде двухвалентного железа.

Описанные выше способы направлены на получение двуокиси титана - TiO_2 . Данный концентрат может служить исходным сырьем для дальнейшего производства металлического Ti, однако чаще для указанных целей используют четыреххлористый титан - $TiCl_4$. Это объясняется тем, что Ti имеет большое сродство к кислороду (O), который растворяется в титане, и даже его незначительное содержание в металле приводит к существенному увеличению хрупкости последнего.

$TiCl_4$ может быть получен разными способами. Одним из них является хлорирование TiO_2 . В некоторых случаях хлорированию подвергается карбид титана (TiC). Преимуществом данного способа является низкая температура процесса (около 200 °C), т.к. при температурах более 700 °C хлор начинает сильно разрушать обычные конструкционные материалы. После хлорирования выполняется очистка четыреххлористого титана от примесей, среди которых можно выделить $SiCl_4$, $FeCl_3$, HCl, Cl и другие.

2.1.2. Производство металлического титана

После выделения из руд титановых концентратов требуется получить чистый металл. Для этого используется реакция восстановления. Однако в виду

высокой химической активности титана, особенно в расплавленном виде, данный процесс имеет ряд требований и ограничений. Титан обладает большим сродством к кислороду, азоту и углероду. Наличие данных элементов даже в небольших количествах существенно повышают хрупкость Ti, что препятствует его дальнейшей обработке давлением. При значительном содержании N и C вместо чистого металла получаются нитрид и карбид. Поэтому необходимо исключить доступ указанных элементов в реакционную среду при восстановлении титана.

Исходным сырьем в процессе восстановления чистого металла являются:

- четыреххлористый титан $TiCl_4$;
- двуокись титана TiO_2 ;
- иодид титана TiI_4 .

В промышленном производстве наибольшее распространение получил $TiCl_4$, т.к. в наименьших количествах содержит неблагоприятные примеси, а процесс его переработки обладает оптимальными технико-экономическими показателями.

Тем не менее, металлический титан, полученный как из TiO_2 , так и из $TiCl_4$, требует дальнейшего рафинирования с целью уменьшения массовой доли вредных примесей.

2.1.3. Восстановление четыреххлористого титана

Основным восстановителем Ti из $TiCl_4$ является Mg . Для проведения необходимых реакций используются специальные реакторы, в которых создана среда инертного газа аргона. Восстановление титана ведется при температуре не более $800\text{ }^{\circ}C$. В результате взаимодействия $TiCl_4$ с Mg выделяется $MgCl_2$ и чистый металл в виде частиц, которые под действием температуры спекаются в рыхлую массу. Эта масса помимо титана содержит избыточный магний, а также

$MgCl_2$. Для их отделения выполняется обработка в вакууме при высокой температуре ($925\text{ }^{\circ}C$), в результате которой Mg и $MgCl_2$ испаряются и остается чистая титановая губка.

Титан, полученный магниетермическим способом, содержит до $0,2\%$ O и до $0,1\%$ N . В настоящее время описанный метод является наиболее востребованным в промышленности для производства металлического Ti .

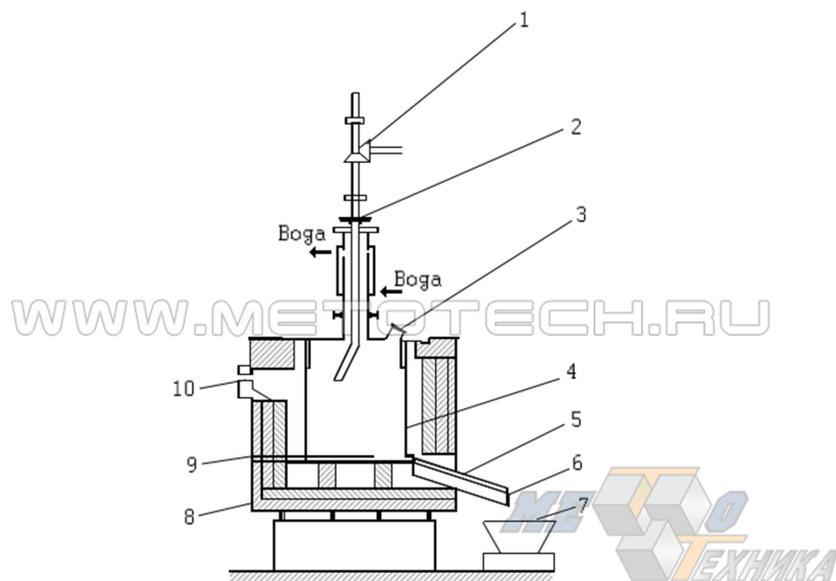


Рисунок 15. Схема усовершенствованного аппарата для магниетермического получения ковкого титана:

1 - привод; 2 - уплотнение; 3 - загрузочное отверстие; 4 - реактор; 5 - затвор; 6 - желоб; 7 - бункер для $MgCl_2$; 8 - печь; 9 - гнездо для термопары; 10 - горелка.

2.1.4. Восстановление двуокиси титана

Среди потенциальных восстановителей TiO_2 можно отметить следующие: углерод, натрий, кальций, магний. Наиболее чистый металл получается при использовании Mg и Ca .

Процесс производства металлического титана с помощью магния выполняется по следующей схеме:

- восстановление TiO_2 магнием при температуре $1000\text{ }^{\circ}C$;
- выщелачивание в 5%-ной HCl ;
- удаление магния отгонкой в вакууме при температуре $1250\text{ }^{\circ}C$, а затем $1450\text{ }^{\circ}C$;
- восстановление кальцием при температуре $1000\text{ }^{\circ}C$;
- выщелачивание в 5%-ной HCl ;
- дегазация при температуре $840\text{ }^{\circ}C$.

Она обеспечивает получение металлического Ti с содержанием $0,16-0,2\%$ O ; $0,05-0,07\%$ Ca ; $0,01-0,03\%$ Mg .

Также хорошие показатели конечного продукта дает гидридный метод восстановления TiO_2 . Он основывается на взаимодействии двуокиси титана с гидридом кальция (CaH_2). В результате получается окись кальция и гидрид титана, который

в дальнейшем разлагается при нагревании, выделяя водород и освобождая металлический титан. Реакция проводится в атмосфере водорода или инертного газа.

2.1.5. Термическая диссоциация иодида титана

В этом способе используется способность титана уже при сравнительно низких температурах вступать в реакцию с парами иода, образуя TiI_4 , который при более высоких температурах диссоциирует (разлагается) на металлический титан и иод.

Для воплощения рассмотренного подхода в жизнь применяются специальные реакторы. По сути, данным способом выполняется удаление вредных примесей (O , N , C) из титана. В общем случае это называется рафинированием. Осаждение Ti выполняется на титановую нить, в результате чего получается компактный пруток, не требующий дальнейшего уплотнения плавкой или другими способами.

Описанный метод позволяет получать титан очень высокой чистоты, однако, является мало производительным и дорогим.

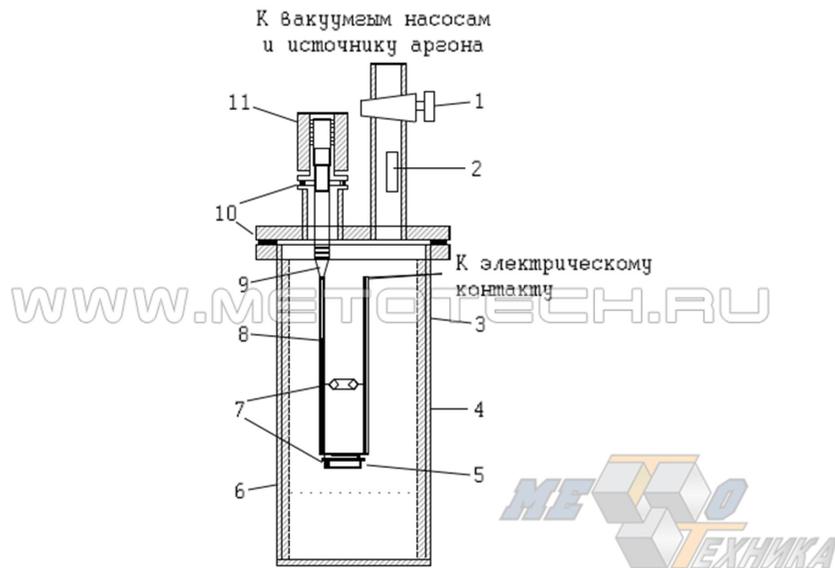


Рисунок 16. Схема типового реактора для рафинирования титана йодидным методом:

1 - кран; 2 - ампула с TiI_4 ; 3 - сырой титан; 4 - экран; 5 - груз; 6 - оболочка; 7 - изолятор; 8 - титановая нить; 9 - вольфрамовый ввод; 10 - вакуумное уплотнение; 11 - электрический контакт.

2.2. ПРОИЗВОДСТВО КОМПАКТНОГО ТИТАНА

Металлический титан производится в виде порошка или губки. Эти формы выпуска являются промежуточными в технологической цепочке изготовления изделий из титана и титановых сплавов. Для производства круглого и плоского проката, востребованного промышленностью, к которому относятся прутки, проволока, листы, фольга, трубы и другие полуфабрикаты, материал должен обладать достаточной пластичностью и плотностью. Для придания титану и его сплавам указанных свойств выполняется их переработка.

К основным способам получения компактного ковкого Ti относятся следующие:

- плавка;
- порошковая металлургия;
- прокатка в оболочке.

2.2.1. Плавка

Свойства титана накладывают большое количество ограничений на данный технологический процесс. Во-первых, высокая склонность титана к взаимодействию с кислородом и азотом требует

проведения плавки без доступа перечисленных газов. Во-вторых, высокая химическая активность Ti особенно в расплавленном виде сильно ограничивает выбор материалов (огнеупоров), из которых могут быть изготовлены элементы печей, имеющие контакт с расплавленным металлом.

Среди большого количества материалов, применяемых для изготовления тиглей, при плавке титана целесообразно использовать только двуокись циркония (ZrO_2), двуокись тория (ThO_2) или графит. Такие популярные огнеупоры, как Al_2O_3 , CaO , BeO , которые хорошо работают в традиционном металлургическом переделе металлов, при плавке титана вступают с ним в активное химическое взаимодействие, что приводит либо к разрушению тигля, либо к серьезному загрязнению Ti .

Непосредственно плавка металла выполняется в индукционных или дуговых электрических печах. В первом случае

нагрев заготовок происходит за счет токов высокой частоты, во втором нагревательными элементами являются стержни из тугоплавких металлов, например, вольфрамовые электроды, или прессованные титановые прутки. Средой, в которой протекает процесс, служит аргон. Также переплав может осуществляться в вакууме.

В качестве способов выплавки компактного титана, которые за счет изменения технологического процесса позволяют повысить чистоту производимого металла, можно выделить бестигельную, капельную и автотигельную плавку. В них предусмотрено уменьшение времени контакта расплавленного Ti с другими частями оборудования, а также его перемешивание для однородной плавки всей заготовки.

Основным достоинством рассматриваемого метода производства компактного титана (плавки) является возможность получения заготовок очень больших размеров.

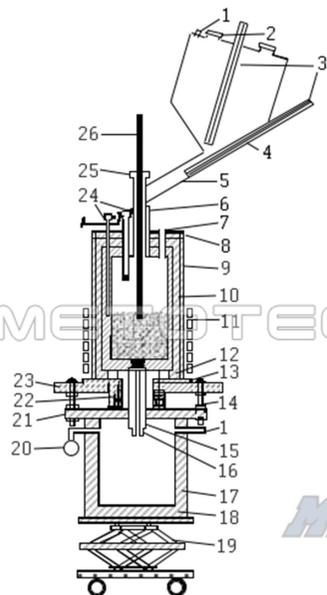


Рисунок 17. Схема индукционной печи с защитной атмосферой для плавки в графитовых тиглях слитков титана весом до 300 кг.

2.2.2. Методы порошковой металлургии

Рассматриваемый подход позволяет избежать трудностей, характерных для плавки. Однако максимальные размеры изделий, которые можно получить с помощью методов порошковой металлургии, существенно уступают размеру слитков, произведенных с помощью плавки. Еще одним плюсом данной технологии является то, что она позволяет существенно сэкономить материал при производстве продукции. Отходы в этом случае составляют в среднем 25% веса готового изделия, в то время как расход металла при изготовлении деталей из поковок превышает массу изделия в 5-10 раз.

В основе технологического процесса лежат 2 операции: прессование и спекание. За счет варьирования их параметров можно влиять на свойства конечного материала. Для прессования выбирается давление, а для спекания - температура и продолжительность. Так существует схема, при которой титановый порошок прессуется под давлением 7750 кг/см^2 и спекается в вакууме при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 16 часов. Есть подходы, подразумевающие многократное спекание.

На выходе данного технологического процесса получают пластичные ковкие брикеты (штабики) или стержни, которые являются полуфабрикатами для дальнейшей переработки в стандартные

типы продукции плоского и круглого сечения. Также существует возможность спекать непосредственно готовые детали сложной формы.

Даже при спекании титана в вакууме есть опасность его загрязнения вслед-

ствие переноса примесей со стенок сосуда, в котором выполняется операция, через газовую фазу. Основным химическим элементом, который может перейти в изделие подобным образом, является кремний (Si), так как спекание выполняется, как правило, в кварцевых трубках.

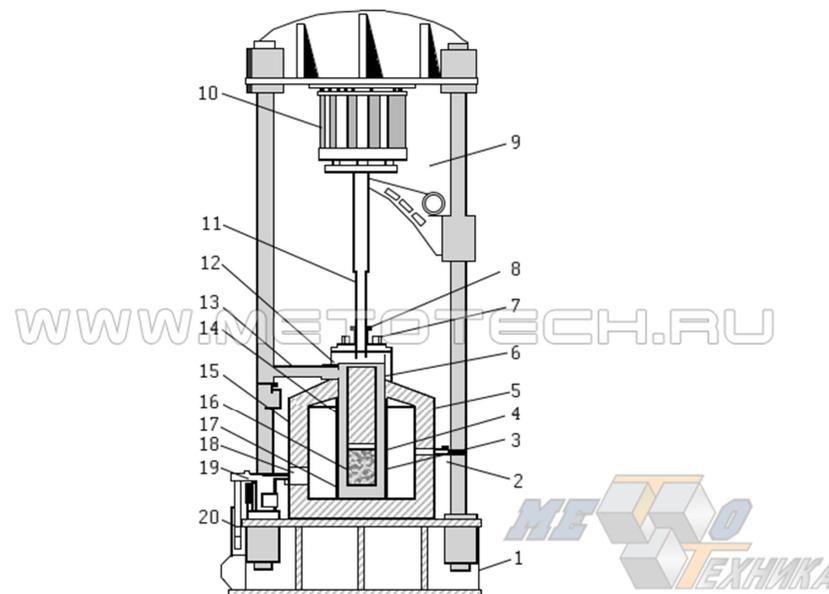


Рисунок 18. Вакуумная установка для горячего прессования титана:

1 - основание; 2 - пирометр; 3 - титановый порошок; 4 - графитовый пуансон; 5 - корпус печи; 6 - графитовый плунжер; 7 - смотровое окно; 8 - уплотняющие набивки; 9 - качающийся подъемник; 10 - гидравлический цилиндр; 11 - водоохлаждаемый стержень; 12 - водяная рубашка; 13 - трубопровод к вакуумным насосам; 14 - вакуумная камера; 15 - огнеупор; 16 - графитовая матрица; 17 - опорная плита; 18 - горелка; 19 - смеситель; 20 - вакуумный насос.

2.2.3. Прокатка в оболочке

Еще одним технологичным способом производства компактного титана является прокатка в оболочке. Как и в способе, описанном в предыдущем пункте, исходным сырьем является порошок титана. Только при прокатке в оболочке отсутствует фаза прессования и устраняется необходимость спекания в вакууме.

В рассматриваемом технологическом процессе титановый порошок заключается в железный контейнер (оболочку), который герметизируется сварными крышками. После выполняется нагрев контейнера до температуры 800-900 °С и выполняется его прокатка стандартным способом. Далее оболочка удаляется, и остается брикет ковкого титана.

При данном способе производства компактного Ti необходимо соблюдать ряд условий. Нагрев контейнера должен выполняться строго до определенной температуры. При ее превышении уже до 1000 °С поверхностный слой железотитанового сплава (возникает при контакте титанового порошка и железной оболочки) плавится, что затрудняет его

удаление из конечной продукции. При температуре ниже 800 °С уплотнение частиц из-за малых скоростей диффузии протекает неэффективно. Также необходимо минимизировать количество остаточного воздуха, которое неизбежно заваривается вместе с порошком в контейнер, и провести откачку водорода, который всегда в растворенном виде присутствует в порошке титана. Наличие H может существенно повысить хрупкость металла.

Из достоинств данного метода можно отметить большую плотность производимого титана по сравнению с полученным методами порошковой металлургии, а также потенциально большие размеры получаемых заготовок.

ГЛАВА 3. ПОЛУФАБРИКАТЫ ИЗ ТИТАНА

3.1. ТИТАНОВЫЕ ПОРОШКИ

3.1.1. Общее описание

Титановый порошок – мелкодисперсная фракция, состоящая из зерен заданной формы, размера и химического состава (рис. 19).



Рисунок 19. Титановый порошок

Порошок можно считать основой основ в процессе получения различных изделий из титана. Это один из важнейших элементов в цепочке создания титановой продукции, от структуры, свойств и характеристик которого во многом зависят параметры получаемых изделий. Порошки титана, вне зависимости от их структурного состава и методов получения, обладают всеми базовыми полезными свойствами данного металла, включая:

- устойчивость к коррозии;
- твердость;

- пористость;
- пластичность;
- термостойкость;
- механическую прочность;
- способность к спеканию и свариваемости;
- легкость;
- износостойкость;
- хорошие показатели прессуемости.

Продукцию различают по весу, насыпной плотности, способности к спеканию, химическому и гранулометрическому составу, марке, способу получения.

Композиционные титановые порошки, помимо базовых свойств основного компонента (Ti), обретают также полезные характеристики входящих в их состав легирующих элементов.

3.1.2. Основные стандарты, марки, требования к качеству

Сообразно способу изготовления и свойствам титановые порошки подразделяются на четыре основных типа, регламентируемых соответствующими стандартами.

3.1.2.1. ТУ1791-449-05785388-2010 «Титан пористый, порошок. Технические условия»

Действие данного стандарта распространяются на категорию титановых пористых порошков (ТПП), создаваемых методом измельчения (размола) титановой губки. Порошки ТПП получают,

Таблица 2. Марки, фракционные показатели и химсостав порошков ТПП

Марки	Фракция, мм.	Массовая доля фракции, ≥	Химсостав, %			
			Ti	Содержание примесей		
				Fe	N	Cl
ТПП-1	-5,1+0	80,01	Базис	1,81	0,31	0,301
ТПП-2	-3,22+0	80,012	Базис	1,81	0,31	0,301
ТПП-3	-3,21+1	80,011	Базис	0,42	0,082	0,11
ТПП-4	-1,01+0	80,011	Базис	1,02	0,21	0,202
ТПП-5	-1,01+0,65	70,021	Базис	0,51	0,153	0,151
ТПП-6	-0,64+0,307	65,01	Базис	0,83	0,252	0,251
ТПП-7	-0,307+0,161	60,011	Базис	1,12	0,511	0,452
ТПП-8	-0,161	60,012	Базис	2,12	1,103	0,504

Частицы порошков ТПП могут обладать чешуеобразной, игольчатой либо округлой (овальной) формой. Для порошков, имеющих овальную форму зерен, обозначение марки дополняется буквенным символом «А», напр. ТПП-ЗА.

Как видно из приведенной таблицы, данные порошки отличает высокое содержание основных примесей. Фактор насыщенности порошков ТПП примесями значительно сужает спектр их использования в высокотехнологичных производственных процессах в сравнении с порошками Ti, изготавливаемыми прочими способами.

Из порошков ТПП изготавливают, главным образом, тугоплавкие титановые композиции и спеченные изделия,

главным образом, перерабатывая отсевы губчатого титана с применением способа гидрирования-дегидрирования.

Порошки ТПП, с учетом размерных параметров зерен и химсостава, подразделяются на восемь марок (табл. 2)

они находят применение и в некоторых других производственных процессах.

3.1.2.2. ТУ 14-22-57-92 «Порошок титановый»

Действие стандарта охватывает, в частности, категорию титановых порошков, получаемых путем восстановления двуокиси титана (TiO₂) гидридом кальция (CaH₂) в гидрид титана (TiH₂) и разложением последнего на H и Ti (дегидрирование).

Порошки, получаемые в рамках данного стандарта, в зависимости от содержания примесей и их массовой доли, имеют следующую маркировку (табл. 3):

Таблица 3. Марки порошков Ti и требования к их качеству согласно ТУ 14-22-57-92

Марка порошка*	Массовая доля, %, не более						
	N	C	h	Fe,Ni	Si	Ca	Cl
ПТК-1	0,07	0,05	0,35	0,35	0,10	0,08	0,003
ПТК-2	0,20	0,05	0,35	0,35	1,00	0,08	0,003
ПТС-1	0,08	0,05	0,35	0,40	0,10	0,08	0,004
ПТС-2	0,20	0,05	0,35	0,40	1,00	0,08	0,004
ПТМ-1, ПТМ-2	0,08	0,05	0,35	0,40	0,10	0,08	0,004
ПТМ (А)-2, ПТМ-3	0,08	0,05	0,35	0,40	0,10	0,05	0,004
ПТМ (А)-3	0,20	0,05	0,35	0,40	1,00	0,08	0,004
ПТОМ-1	0,08	0,05	0,40	0,40	0,10	0,08	0,004
ПТОМ-2	0,20	0,05	0,40	0,40	1,00	0,08	0,004
ПТ	-	-	≥ 3,5	-	-	-	-

Примечание: * - ПОМ - очень мелкий; А - для пиротехники; г. - гидрированный; цифры 1-3 отражают различия в массовых долях примесей:

T - титановый; К - крупный; С - средний; М - мелкий.

Порошки Ti и его сплавов, производимые данным способом, имеют иррегулярную (неправильную) форму зерен и развитую поверхностную структуру (рис. 20). Поэтому они хорошо поддаются формовке при относительно невысоких показателях пресс-давления как в жестких матричных емкостях, так и в эластичных контейнерах (способ гидростатического прессования).

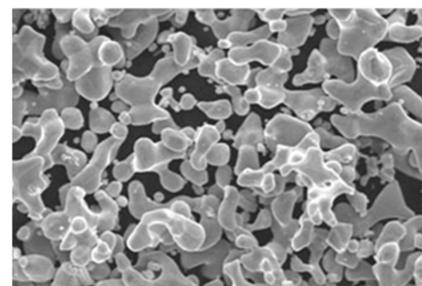


Рисунок 20. Структура зерен титановых порошков, изготавливаемых восстановлением в рамках ТУ 14-22-57-92

Такие порошки востребованы для производства компонентов часов и электронных приборов. С их помощью также

производят фильтры для обеззараживания воды и воздуха, устранения механических включений. Кроме того, порошки, изготавливаемые в рамках данного стандарта, часто используются в пиротехнической сфере.

3.1.2.3. ТУ 48-10-78-83 с 7 изменениями «Порошок титановый химический»

Порошок титановый химический (ПТХ), изготавливаемый по этому стандарту, получают из губчатого Ti с применением механохимического, термохимического (металлотермия) и плазмохимического методов.

В зависимости от химсостава, размерности и твердости зерен по Бринеллю порошки ПТХ выпускаются четырнадцати марок (табл. 4), где аббревиатура ПТХ обозначает общее название («Порошок титановый химический»), 1-я цифра отображает тип (НВ) порошка по величине частиц, а вторая – по показателю НВ.

Таблица 4. Марки порошков титановых химических и требования к их качеству

Марка	Фракции, мм.	Отклонение от нормы, % не более		Массовая доля примесей, %, не более			
		крупнее	мельче	Ке	Сl	N	H
ПТХ-1-1	-3,0+1,0	10	10	0,3	0,06	0,05	0,1
ПТХ-1-2	-3,0+1,0	10	15	0,8	0,07	0,08	0,2
ПТХ-2-1	-1,0+0,63	10	10	0,3	0,06	0,05	0,1
ПТХ-2-2	-1,0+0,63	10	15	0,8	0,08	0,08	0,2
ПТХ-3-1	-1,0+0,18	10	10	0,3	0,07	0,05	0,1
ПТХ-3-2	-1,0+0,18	10	15	0,8	0,09	0,08	0,2
ПТХ-4-1	-0,63+0,18	10	10	0,4	0,08	0,08	0,1
ПТХ-4-2	-0,63+0,18	10	15	0,9	0,09	0,08	0,3
ПТХ-5-1	-0,45+0,18	10	10	0,8	0,10	0,10	0,4
ПТХ-5-2	-0,45+0,18	10	15	1,0	0,12	0,12	0,6
ПТХ-6-1	-0,18	15	-	0,8	0,09	0,08	0,2
ПТХ-6-2	-0,18	30	-	1,8	0,10	0,20	0,5
ПТХ-7-1	-0,18	15	-	0,9	0,09	0,08	0,5
ПТХ-7-2		30		1,8	0,10	0,20	0,9

Примечание. По требованию или по согласованию с потребителем выпускаются партии порошка, насыщенные водородом; содержание водорода гарантируется технологией.

Порошки ПТХ применяют, главным образом, для изготовления конечной продукции способами порошковой металлургии.

3.1.2.4. ТУ 48-10-22-85 «Порошок титановый электролитический. Технические условия»

Для получения порошков титана электролитических (ПТЭ) применяют метод электролиза солевых расплавов. Их характерное отличие – незначительная доля примесей, в особенности О и N.

Характеристики ПТЭ представлены в табл. 5.

Таблица 5. Марки ПТЭ и требования к их качеству

Марка	Фракции, мм	Отклонение от нормы, % не более		МВ, не более	Содержание примесей, %, не более					
		крупнее	мельче		Fe	Cl	N	O	C	Si
ПТЭК-1	-5+0,63	10	15	120	0,06	0,06	0,03	0,06	0,02	0,02
ПТЭК-2	-5+0,63	10	15	155	0,10	0,08	0,04	0,08	0,02	0,02
ПТЭС-0	-0,63+0,18*	2	10	100	0,04	0,05	0,03	0,05	0,01	0,01
ПТЭС-1	-0,63+0,18	2	10	120	0,06	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02
ПТЭС-2	-0,63+0,18	2	10	155	0,10	0,08	0,04	0,08	0,02	0,02
ПТЭМ-1	0,18	5	-	-	0,08	0,06	0,03	-	0,03	0,04
ПТЭМ-2	0,18	5	-	-	0,20	0,15	0,05	-	0,03	0,04

Примечание: * - доля фракции 0,08 мм. не более 9%

Сообразно гранулометрическому составу к основному названию марки добавляют символы К (крупный), С (средний) и М (мелкий). Цифровые обозначения 0 1 2 после буквенной аббревиатуры обозначают группы в зависимости от состава и твердости по Бринеллю. Конфигурация зерен – дендритная, пластинчатая или осколочная.

Порошки ПТЭ наиболее пластичны. Их характеризует минимальная усадка в ходе спекания, что обеспечивает возможность получения изделий, имеющих высокую плотность. Свойства ПТЭ возможно регулировать в широком диапазоне за счет изменения параметров электролиза.

3.1.3. Производственные технологии

Выбор производственных технологий изготовления титановых порошков обусловлен широким применением получаемой из них продукции в различных хозяйственных отраслях. При этом свойства порошкообразного Тi и его сплавов могут изменяться в широком функциональном диапазоне и зависят от способа получения. Что, в свою очередь, позволяет изготавливать продукцию промышленными партиями.

На сегодняшний день разработано большое количество технологических схем изготовления порошков на титановой основе.

К наиболее значимым из них можно отнести:

- измельчение компактного Тi (в т.ч. с применением способа гидрирования-дегидрирования);

- восстановление диоксида титана (TiO₂) с помощью гидрида кальция (CaH₂) в гидрид титана (TiH₂) и разложение последнего на H и Ti (гидрирование-дегидрирование).

- способ металлотермического восстановления с помощью Mg или Na из четыреххлористого титана (TiCl₄);

- электролиз расплавов солей Ti.

Рассмотрим перечисленные производственные технологии получения титанового порошка более подробно.

3.1.3.1. Механический способ изготовления порошков из пористого Ti (ТПП)

Простейшей и самой малозатратной технологией получения пористого порошка Ti (ТПП по ТУ1791-449-05785388-2010) является измельчение и сепарация титанового сырья губчатой структуры. Титановая губка имеет вид рыхлой пористой массы, получаемой из концентрата ильменитовых руд и способной активно адсорбировать пары воды, кислород и азот.

Процесс измельчения осуществляется в специальных мельницах-дробилках (рис. 21).



Рисунок 21. Мельница для губчатого титана

Однако сам по себе размол без дополнительных операций не способен обеспечить получение порошка с зернами правильной формы. Между тем, порошки, в которых частицы имеют правильную форму, лучше спекаются, а полученные из них изделия отличаются сочетанием полезных функциональных качеств, и прежде всего – долговечностью. Поэтому для выпуска высококачественных порошков требуемой структуры, помимо механического измельчения, применяется сопутствующий способ гидрирования (насыщения водородом) исходной шихты с последующим дегидрированием.

Сущность данного способа заключается в том, что, водородонасыщенный титан – весьма хрупкое соединение. Исходное титановое сырье (стружка, губка) подвергают насыщению водородом – гидрированию – до показателей в пределах $338...372 \text{ см}^3 \text{ H}_2$ на 1 г. Ti.

Затем полученный гидрид размалывают до требуемой степени дисперсности, после чего производят обезводороживание путем термовакuumного дегидрирования в температурном режиме $710...810 \text{ }^\circ\text{C}$.

В ходе процесса дегидрирования происходит спекание зерен Ti. Для получения готовой продукции спек подвергают измельчению до необходимой консистенции. Контроль гранулометрического состава выполняется путем просеивания измельчаемого спека сквозь сита, ячейки которых имеют определенные размерные параметры. Частицы такого порошка характеризуются осколочной формой. Качество получаемого финишного продукта зависит от чистоты сырья, выход которого, при остаточной насыщенности до $4,22 \text{ см}^3 \text{ H}_2$ на 1 г Ti, составляет 92% и более от массового количества исходного гидрида.

В промышленных масштабах способом гидрирования-дегидрирования получают мелкодисперсный порошок Ti фракционного состава $(-0,103+0,042)$ мм. Выход готового продукта превышает 94,89% от массового количества исходного титанового сырья.

3.1.3.2. Восстановление диоксида титана гидридом кальция

Метод восстановления двуокиси титана (TiO_2) – минерального сырья высокой химической чистоты – в дигидрид титана (TiH_2) с последующим разложением его на чистый титан (Ti) и водород (H) имеет широкое практическое применение. CaH_2 как восстанавливающий реагент используется благодаря высокой химической активности Ca, что делает возможным восстановление подавляющего большинства металлических и не-

металлических оксидов безотносительно к их термодинамическим свойствам. При этом CaH_2 не образует твердых растворов и других химических соединений с восстанавливаемыми металлами.

В химическом плане реакцию восстановления можно рассматривать как

кальциетермический процесс, отображаемый в виде следующей последовательности:

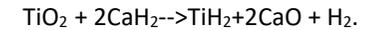


Схема промышленной установки для восстановления TiH_2 из TiO_2 с помощью CaH_2 представлена на рис. 22.

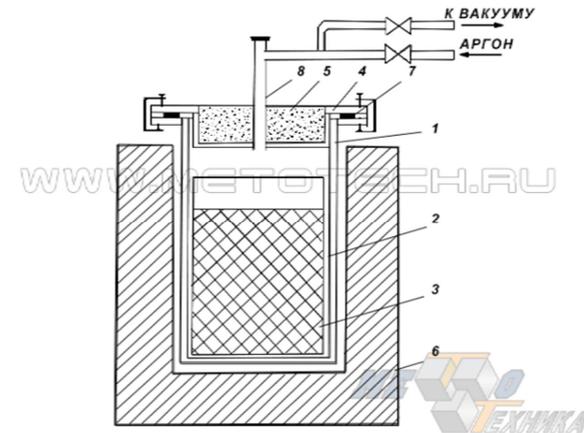


Рисунок 22. Схема установки для восстановления TiH_2 из TiO_2 с помощью CaH_2

1 – корпус аппарата (реторта); 2 – стальной тигель; 3 – загружаемая шихта; 4 – крышка; 5 – теплоизолирующая засыпка; 6 – электропечь; 7 – уплотнение; 8 – патрубок для присоединения к вакуум-насосу или источнику H.

Реакция восстановления осуществляется в вакууме при температуре 900...1100° С. Исходная порошковая шихта в виде композиции из TiO_2 и CaH_2 загружается в реторту реактора, изолированную от корпуса печи. После откачки из реторты атмосферного воздуха в нее нагнетают водород высокой очистки, в среде которого происходит восстановительная реакция и остывание полученного продукта после вывода реторты из печи. Остывший спек извлекают, измельчают и выщелачивают из него CaO слабым раствором HCl . После этого оставшийся порошок TiH_2 подвергают термическому дегидрированию в вакууме при температуре 700...800°С.

Характеристики порошков марок, произведенных данным способом, отвечают требованиям ТУ 14-22-57-92.

Порошковый Ti , получаемый путем восстановления TiH_2 из TiO_2 с помощью CaH_2 , характеризуется пористой структурой высокой дисперсности. К сожалению,

в его составе велик процент содержания посторонних примесей, а потому без сложной и весьма затратной дополнительной очистки (рафинирования) он малоприспособен для промышленного выпуска конструкционной продукции способами порошковой металлургии. Из такого порошка производят различные пористые фильтры-геттеры (газопоглотители) для пищевой и химической промышленности, ряда других промышленных отраслей.

3.1.3.3. Метод металлургического восстановления титановых порошков из тетрахлорида титана ($TiCl_4$)

Наиболее востребованным в промышленных целях является т. наз. металлургический метод изготовления высокочистых титановых порошков из четыреххлористого титана ($TiCl_4$) путем воздействия на него Mg (магнетермия) или Na (натриетермия). Общая схема процесса представлена на рис. 23

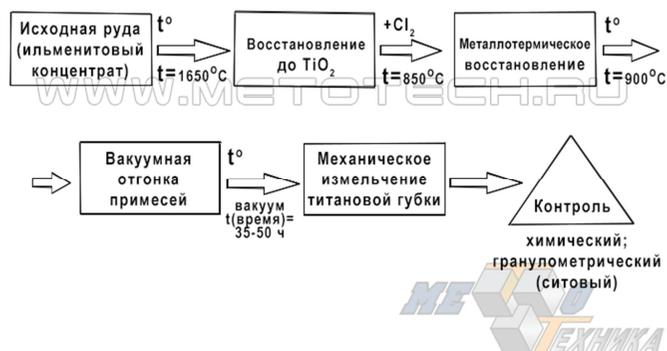


Рисунок 23. Общетехнологическая схема получения порошкового Ti методом металлургического восстановления $TiCl_4$

В качестве исходного первоначального сырья для осуществления процесса используют ильменитовый концентрат, выделяемый из титаномагнетитовых руд путем их обогащения. Свое название данный продукт получил из-за высокого содержания в нем минерала ильменита ($FeO \cdot TiO_2$).

Состав концентрата в определенных долях включает:

- двуокись титана TiO_2 – 42...47 %;
- оксид железа (II) FeO – около 30 %;
- оксид железа (III) Fe_2O_3 – около 20 %

Технологический цикл восстановления титана из концентрата включает ряд последовательно выполняемых стадий:

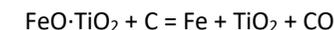
- восстановительную плавку концентрата с целью образования шлака, насыщенного двуокисью титана TiO_2 ;

- хлорирование TiO_2 для получения тетрахлорида $TiCl_4$;
- металлургическое восстановление из $TiCl_4$ чистого Ti в виде губки, измельчаемой до порошковой консистенции.

3.1.3.3.1. Восстановительная плавка ильменитового концентрата

В ходе данной операции происходит восстановление оксидов железа до чугуна с отделением шлака, насыщенного двуокисью титана TiO_2 .

Химическая формула реакции:



Плавка осуществляется в температурном режиме ~ 1650-1700 °С в электродуговых печах (рис. 24), куда загружают исходную измельченную шихту из ильменитового концентрата в смеси с углеродным восстановителем в виде кокса, антрацита или древесного угля.

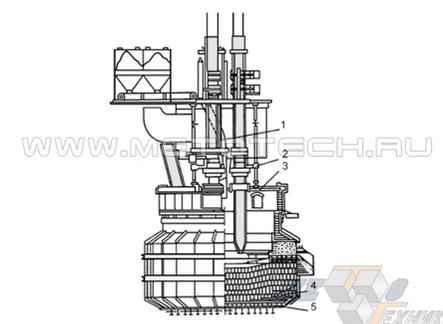


Рисунок 24. Конструкционная схема печи для восстановительной плавки:

1 – подача шихты; 2 – подвод электроэнергии к плавильным электродам; 3 – свод с системой водоохлаждения; 4 – слой магнетитовой футеровки; 5 – печной кожух.

В ходе плавки происходит восстановление насыщаемого углеродом железа с образованием чугуна и шлака, содержащего до 82-92 % диоксида титана (TiO_2). Полученный чугун удаляют, а титаносодержащий шлак размалывают и очищают от железосодержащих частиц путем магнитной сепарации, после чего, смешав с определенным количеством мелкого нефтяного кокса, брикетируют. Брикетные обжигают при 710—810 °С и направляют на участок обогащения хлором для получения $TiCl_4$ – исходного сырья для металлотермического восстановления чистого титана.

3.1.3.3.2. Получение тетрахлорида титана ($TiCl_4$) хлорированием TiO_2

Тетрахлорид титана ($TiCl_4$) получают, воздействуя на диоксид титана (TiO_2) газообразным хлором (Cl) в температурном диапазоне 710...910 °С.

Химическая формула реакции:



Существует две основных промышленных технологии хлорирования TiO_2 с переходом в $TiCl_4$, различия которых обусловлены типом применяемого реактора-хлоратора.

Наиболее распространенной является технология с использованием электропечей-реакторов шахтного типа.

Востребованным являются также метод обогащения хлором двуокиси титана в расплаве солей (KCl , $NaCl$, $CaCl_2$, $MgCl_2$) с применением специальных солевых хлораторов.

3.1.3.3.2.1. Хлорирование в шахтных хлораторах

В электродуговую печь загружают брикеты исходной шихты, спрессованные из титаносодержащего шлака и нефтяного кокса, которые насыщают газообразным хлором в режиме высоких температур. Интенсивность, а значит, и продолжительность реакции определяется температурой процесса, размерными характеристиками брикетов, процентным составом ингредиентов (шлак с TiO_2 + нефтяной кокс), степенью их дисперсности, показателями пористости и некоторыми другими факторами.

Процесс, имеющий гетерогенный характер, включает в себя три условных технологических цикла:

- нагнетание Cl к шихтовой массе;
- диффузионное проникновение Cl в тело брикета;
- непосредственно процесс реакции.

Характеристики первого цикла определяются особенностями динамики газового потока. Насыщение брикета Cl, а значит, и сама реакция, протекает постепенно, с образованием хлорируемой зоны, ограниченной по протяженности и постепенно смещающейся от поверхностного слоя вглубь брикета, к его центру, оставляя за собой непрохлорированный «огарок».

Глубина хлорируемой зоны определяется температурным критерием: уже при 410-460 °С она превышает радиус брикета, обеспечивая непрерывность насыщения его пор хлором по всему

объему (кинетическая зона). С дальнейшим наращиванием температуры коэффициент интенсивности реакции начинает превышать константу диффузии газов, вследствие чего происходит смещение вектора процесса в переходную, а затем в диффузионную зону.

На **рисунке 25** представлено схематическое изображение шахтной электропечи (ШЭП) с полунепрерывным принципом функционирования.

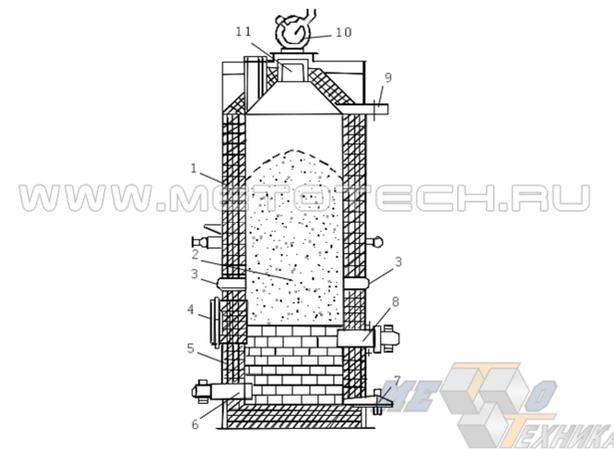


Рисунок 25. Схема шахтной электропечи (ШЭП) полунепрерывного действия:

1 — футеровочный слой; 2 — брикетированная шихта; 3 — патрубки подвода хлора; 4 — смотровая отдушина; 5 — слой графитоугольной набивки; 6 — нижние электроды; 7 — летка; 8 — верхние электроды; 9 — труба для отведения парогазовой смеси; 10 — питатель золотникового типа; 11 — загрузочный колодец.

Нижнюю зону футерованной (1) печи заполняют графитоугольной набивкой (5), разогреваемой сверху и снизу (6,8) электродами до ~ 710 °С, что обеспечивает поддержание в расплавленном виде образуемых высококипящих хлоридов Mg, Ca и Fe.

На графитоугольную набивку сквозь отверстие загрузочного колодца (11) через питатель золотникового типа (10) засыпается брикетированная шихта (2),

сквозь которую пропускают поток подогретого хлора (3). Хлор интенсивно реагирует почти со всем объемом шихты (остаточное содержание – не более 0,01% общей массы). В ходе экзотермической реакции температура в хлорируемой зоне возрастает до ~ 1150 °С.

Основные продукты реакции (тетрахлорид Ti, а также, в небольшом количестве, хлориды Al, Fe, V, Si и др.) переходят в газообразное состояние. Образующуюся парогазовую смесь выводят из

реактора сквозь специальную трубу в его верхней зоне (9). Соотношение CO_2 : CO в парогазовой смеси на выходе из выводящей трубы варьируется в диапазоне 1,01 : 5,01÷8,01. Такая смесь в соединении с кислородом взрывоопасна: во избежание подсоса воздуха в реакторной емкости поддерживают режим избыточного давления. Степень перехода TiO_2 в TiCl_4 очень высока, достигая 99 %. Оставшийся непрохлорированный шлак периодически выгружается сквозь летку в нижней части печи (7).

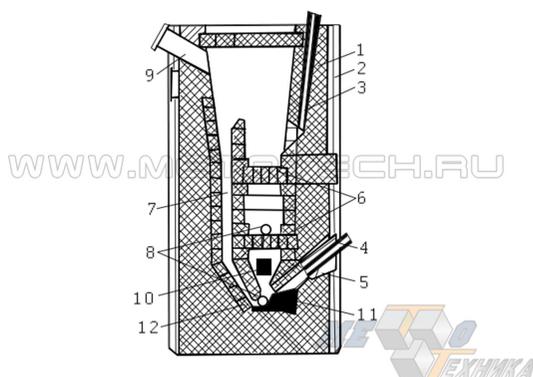


Рисунок 26. Солевой хлоратор (схема)

1 — реакторная емкость; 2 — внешний контур; 3 — канал засыпки шихты; 4 — подача хлора; 5 — фурма (нагнетательное устройство); 6 — распределительные решетки; 7 — тракт циркуляции парогазовой смеси; 8 — летки для удаления непрохлорированного остатка; 9 — труба, отводящая парогазовую смесь; 10 — электрод из графита; 11 — графитовая подина; 12 — футеровочный слой.

Процесс хлорирования протекает в реакторной реторте, заполняемой солевым расплавом (KCl , NaCl , CaCl_2 , MgCl_2).

Измельченная шихта из насыщенного TiO_2 шлаковой составляющей в смеси с нефтексом засыпается на поверхностный слой расплава сквозь загрузочный

3.1.3.3.2. Хлорирование в расплаве солей

Процесс получения TiCl_4 путем насыщения TiO_2 хлором в расплавах солей также находит промышленное применение. На **рисунке 26** приведено схематическое изображение реактора, действующего по данному принципу

канал-течку (3). В нижнюю часть реторты под давлением нагнетается хлор (4, 5), вследствие чего происходит бурная циркуляция расплава с выделением и отводом (7, 9) CO_2 и CO , концентрация которых не превышает 4,5 % общего объема. Нагнетаемый хлор вступает в реакцию со

слоем шихты, равномерно размещенной по всей площади распределительных решеток (6). Температурный диапазон протекания реакции — 740-820 °С.

3.1.3.3.3. Металлотермическое восстановление Ti из TiCl_4 при помощи Mg и Na

Восстановление титана из тетрахлорида TiCl_4 металлотермическим способом (**рис. 27**) осуществляется с использованием Mg (магнийтермия) или Na (натрийтермия).



Рисунок 27. Промышленная линия металлотермического восстановления Ti из TiCl_4

При этом магнийтермия и натрийтермия, при общей схожести технологических операций, обладает своими достоинствами и недостатками.

3.1.3.3.3.1. Восстановление магнием (магнийтермия)

Для магнийтермического восстановления применяют установку (**рис. 28**), состоящую из печи и помещаемой в ее корпус герметичной реторты из хромоникелевой стали. Реторту разогревают

до ~ 760 °С, после чего в нее загружают измельченный TiCl_4 , заливаемый расплавом Mg .

Основная реакция процесса ($\text{TiCl}_4 + 2\text{Mg} = \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$), являясь экзотермической, протекает с выделением тепла, вследствие чего функцию электронагрева периодически приостанавливают, охлаждая реторту воздушной струей для соблюдения температурного режима, не выходящего за пределы 810...910 °С. Регуляция температуры возможна также за счет изменения интенсивности подачи TiCl_4 . Продолжительность восстановительного цикла может составлять 32-52 ч. За это время в реторте формируется губчатый титановый спек. Пребывающий в жидком состоянии MgCl_2 откачивают из реторты, не прерывая процесса.

Титановый губчатый спек вбирает в себя большое количество MgCl_2 и Mg . В связи с этим по завершении восстановительного цикла производят вакуумную отгонку примесей. Реторта после разогрева до ~ 1050 °С и создания в герметичной емкости вакуумного разрежения постепенно остывает на протяжении 38-58 ч. до полного испарения примесей. В ряде случаев удаление примесей из губчатого спека производится уже после его извлечения из реторты. Удаление из реторты блока спеченной титановой губки выполняют, используя для этого гидравлический пресс.

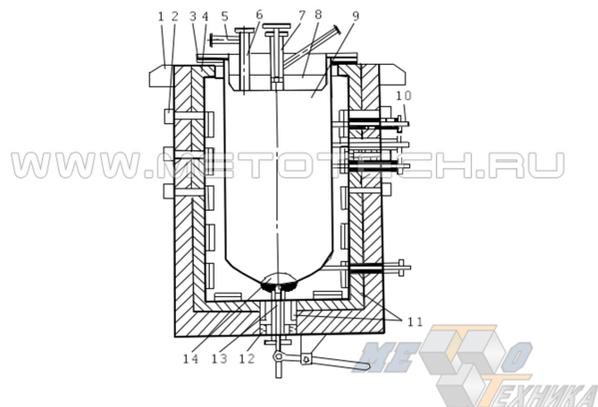


Рисунок 28. Схема установки для магнийтермического восстановления Ti из TiCl₄:

1 – опорная плоскость печи; 2 – коллекторы нагнетания/откачки воздуха; 3 – соединительный фланец с водоохлаждением; 4 – футеровочный слой; 5 – патрубок со штуцером для вакуумирования и нагнетания инертного газа (Ar); 6 – колодец заливки Mg; 7 – колодец подачи TiCl₄; 8 – крышка реторты; 9 – емкость реторты; 10 – термопупы контактного типа; 11 – термоэлектроды; 12 – песчаный затвор; 13 – шток слива; 14 – псевдоднище.

После извлечения блок губки разделяют на неочищенную титановую крицу и шлаковый гарнисажный слой. Гарнисаж сразу же удаляют, а крицу очищают механическим способом с применением пресса, отделяя контактирующий с решеткой поверхностный слой на толщину 1,5-2 см, до обнажения чистого металла. После этого с поверхности крицы посредством пневмозубила отделяют остаточные загрязнения. Далее очищенную крицу перерабатывают на прессе, способном выполнять предварительную полойную резку. Срезанный с верхушки блока крицы слой губчатого Ti (примерно четвертая часть общей толщины

блока) измельчают в шаровой мельнице, после чего подвергают отсеиванию по фракциям на барабанных грохотах. Затем цикл очистки повторяют по отношению к каждому последующему слою блока крицы.

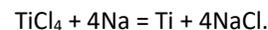
Каждая партия конечного продукта (порошковый Ti) комплектуется из определенной фракции с проведением химанализа на процентное содержание Ni, Cr, Fe и других включений согласно требованиям к марке титанового порошка.

3.1.3.3.3.2. Восстановление натрием (натриетермия)

Принцип восстановления Ti с помощью Na во многом схож с магниетермией, что обуславливает и общность конструкции применяемых промышленных установок.

В емкость реакторной реторты подается TiCl₄ и жидкий натрий.

Реакция восстановления протекает по формуле:



Высокотемпературный режим (810-890 °C) поддерживается благодаря экзотермическому характеру реакции, протекающей с выделением тепла. Получаемый губчатый спек содержит 17,5 % Ti и 82,5 % NaCl. После извлечения из корпуса реактора монолитный спеченный блок подвергают измельчению и операции выщелачивания NaCl, после чего остаток в виде чистого Ti размалывают в мелкодисперсный порошок для товарной расфасовки.

3.1.3.3.3.3. Сравнение магниетермического и натриетермического способов восстановления Ti из TiCl₄

Химсостав титанового порошка, изготовленного методом магниетермии, характеризуется такими параметрами:

- 0,015-0,55 % Mg;
- ~0,072 % Cl;
- ~0,11 % H;
- 0,014-0,048 % N;

- 0,032-0,041 % C.

Остальное – чистый Ti.

Подвергая спрессованный в брикеты порошок последующим циклам прогрева и вакуумного спекания в среде инертного газа (Ar) при 1055°C возможно понизить содержание Mg и H до сотых и даже тысячных долей процента с сопутствующим возрастанием чистоты Ti до 99,6—99,8 %. Что касается Cl и N, то их можно полностью удалить, подвергнув порошок дополнительной переплавке.

Несомненным достоинством натриетермии является намного более низкая, в сравнении с Mg, T° плавления Na (соответственно, 650 и 97,8 °C), что весьма упрощает процессы очистки и подачи в реактор жидкого Na. Однако количество теплоты, выделяемой при натриетермии, на 72% превышает аналогичный параметр магниетермического процесса, что обуславливает необходимость дополнительных энергозатрат на принудительное охлаждение (примерно на 25% выше в сравнении с магниетермией) и ограничивает возможность протекания процесса с высокой скоростью (удельная производительность реакторов при натриетермии ниже по сравнению с магниетермией). Кроме того, по качеству натриетермический Ti значительно уступает металлу, полученному магниетермическим способом.

Результаты приведенного выше сопоставления, в общем и целом, свидетельствуют в пользу магниетермии, поэтому данный способ восстановления титана востребован гораздо шире, чем

натриетермический. Вместе с тем, в ряде ситуаций натриетермия оказывается единственным возможным вариантом получения порошкового титана с требуемыми функциональными характеристиками.

3.1.3.4. Получение высокочистых порошков Ti электролитическим разложением тетрафторида TiF₄

В отличие от металлотермического восстановления, метод получения Ti из

TiF₄ основан на **разложении** четырехфтористого титана с применением электролиза без необходимости использовать дорогостоящий металл-восстановитель.

3.1.3.4.1. Общее описание техпроцесса

Процесс происходит поэтапно в рамках схемы, изображенной на **рис. 29**

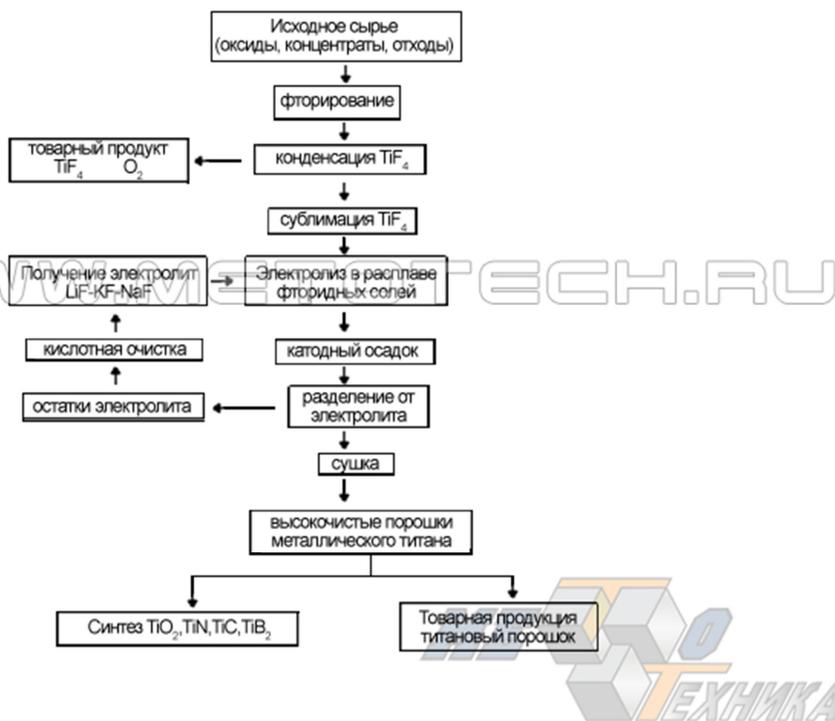
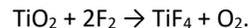


Рисунок 29. Схема получения чистого порошкового Ti путем электролиза TiF₄

На первоначальной стадии получают востребованный для электролитического разложения TiF₄ из подвергаемых фторированию исходных титаносодер-

жащих материалов (гл. обр. в виде диоксида TiO₂, а также концентратов, отходов и т.д.).

Химическая реакция фторирования TiO₂ протекает по формуле:

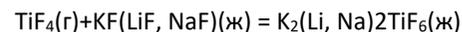


При этом реагирование, вследствие экзотермического характера реакции, происходит с выделением тепла и самоподогревом реагентов до 310-360 °С. На выходе образуется газообразная композиция, состоящая из смеси паров тетрафторида титана (95,5-98,2 % объема исходного сырья) и кислорода. TiF₄ отделяют от O₂ путем конденсации, а затем, после откачки кислорода и очистки от нелетучих примесей, чистый конденсат вновь сублимируют в газообразную фазу.

Основная стадия общетехнологического процесса осуществляется в аппарате-электролизере и предусматривает непосредственно электролитическое получение металлического Ti из TiF₄ в предварительно подготовленном расплаве электролита-флиака.

Флиак представляет собой относительно низкоплавкую (T_{пл}=473 °С) эвтектическую смесь фторидных солей щелочных металлов (0,51 М LiF - 0,38 М KF - 0,11 М NaF). Электролиз осуществляется в вакууме, в среде инертного газа. После расплавления флиака из электролизера откачивают воздух, заполняют емкость аргоном и герметизируют.

Газообразный сублимат TiF₄ порционно направляют в расплавленную фторидную эвтектику, насыщение которой происходит с выделением большого количества тепла и образованием комплексной соли:



Подача на электроды электролизера постоянного тока сопровождается следующими процессами:

- на катоде образуется осадок в виде механической смеси частиц чистого Ti и компонентов электролита (Ti⁴⁺ + 4e → Ti⁰);
- на аноде выделяется газообразный фтор (4F⁻ - 4e → 2F₂ °).

Катодный осадок периодически счищают и собирают в приемной емкости, являющейся составной частью электролизера. Выделяющиеся на аноде и скапливающиеся в верхней части аппарата пары фтора очищают от аэрозольных примесей и направляют на регенерацию, после чего возвращают в цикл.

На завершающей стадии скопившийся в приемной емкости электролизера катодный осадок извлекают и вымывают из него посторонние включения, после чего порошок чистого Ti сушат и расфасовывают.

Получаемый порошок титановый электролитический (ПТЭ) имеет высокую чистоту и может применяться с целью изготовления фильтрующих элементов и газопоглощающих геттеров (**рис. 30**).



Рисунок 30. Геттеры из электролитического титанового порошка

Использование ПТЭ практикуется также для нужд порошковой металлургии (в т.ч. синтез оксидов, карбидов, боридов, нитридов, гидридов и других соединений титана).

3.1.3.4.2. Преимущества метода

1. Порошок титана электролитический (ПТЭ), получаемый описанным выше способом, является высокочистым сырьем, не подлежащим, в отличие от губки, дополнительному измельчению и рафинированию – операциям сложным и весьма затратным.

2. Процесс протекает по замкнутому циклу без использования восстановителей из дорогостоящих металлов (Mg, Na, Ca и др.).

3. Гибкая технология позволяет использовать различное титаносодержащее исходное сырье и быстро переходить с одной его разновидности на другую.

4. Применение электролита в виде низкотемпературной солевой эвтектики обеспечивает снижение температурного диапазона с сопутствующим энергосбережением.

Кроме того, к числу достоинств метода можно отнести:

- пожаро- взрывобезопасность;
- экологичность;
- высокую производительность оборудования;

- возможность максимально автоматизировать производственные процессы на всех этапах общетехнологического цикла.

Сумма перечисленных преимуществ обеспечивает возможность минимизировать себестоимость конечного продукта, а значит, предельно расширить сферу его практического применения.

3.1.3.5. Получение высокочистого Тi методом электротермического йодидного рафинирования титанового сырья, загрязненного примесями

В основу данной технологии заложен принцип термической диссоциации газообразного йодида TiI_4 на поверхности накаляемой электродом до высокой температуры (1301...1501 °С) титановой проволоки. К сожалению, на сегодняшний день ее применение позволяет получать высокочистый титан лишь малыми партиями.

Сущность метода йодидной очистки Тi от примесей O, N, C состоит в том, что подавляющее большинство оксидов, нитридов и карбидов нейтральны по отношению к йоду, не вступая во взаимодействие с этим химическим элементом. В ходе процесса рафинирования устраняются также примеси металлов, которые не образуют летучих йодидов.

На **рис. 31** представлена схема установки для электротермического йодидного рафинирования Тi. Корпус аппарата выполнен из не подверженного воздействию паров йода сплава Ni (82 %) и Cr (18 %).

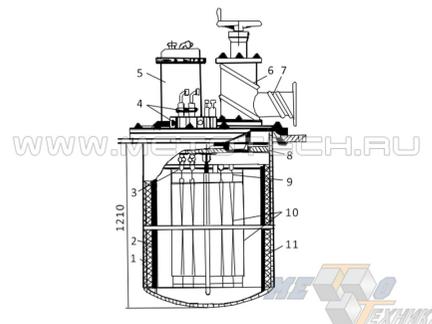


Рисунок 31. Установка для электротермического йодидного рафинирования Тi:

- 1 – внешняя оболочка;
- 2 – сетчатая стенка из Мо, формирующая кольцевую полость для загрузки исходного титанового сырья;
- 3 – площадка для подвешивания титановых нитей;
- 4 – токоподводящие молибденовые электроды;
- 5 – корпус термостата, содержащего ампулу с йодом;
- 6 – затворно-вакуумное устройство;
- 7 – труба откачки воздуха для создания вакуума;
- 8 – крышка реактора;
- 9 – крючки из Мо, на которые подвешиваются отрезки титановой проволоки;
- 10 – отрезки проволоки из Тi, последовательно соединенные общим молибденовым проводником;
- 11 – загружаемое в аппарат исходное титановое сырье.

Исходное титановое сырье в виде крупнозернистого порошка, мелкой стружки или губки располагают в кольцевой полости между внешней оболочкой аппарата и параллельно расположенным экраном сетки из

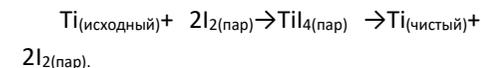
молибдена, не вступающего в реакцию с йодом и йодидами Тi.

В центральной части реактора на специальных молибденовых крючках-подвесах натянута шесть прямых двухметровых стержней из титановой проволоки (\varnothing 2,5-3,5 мм), последовательно соединенных между собой молибденовым проводником и образующих, таким образом, единую цепь общей длиной 12 м.

Верхние концы крайних стержней подсоединены к молибденовым токоподводящим электродам. К корпусу реактора примыкает термостат, осуществляющий поддержание заданного температурного режима в полости с титановым сырьем (в диапазоне 100,1...200,1 °С). Внутри термостата размещается стеклянная ампула с йодом.

Сначала из реторты реактора откачивают воздух до создания необходимого вакуумного разрежения. Затем, раздавливая ампулу, впускают в реактор йод и подают на проволоку электрический ток, раскаляющий ее до 1301...1501 °С. Количество йода составляет около 7,1-10,1 % от массы загружаемого титанового сырья.

Технологический цикл характеризуется трехэтапным течением в рамках общехимической схемы:



1. Исходный Тi (загрязненный примесями O, N, C и, в меньшей

концентрации, других химических элементов), взаимодействует с парами йода при относительно низкой температуре (100,1...200,1 °С), образуя газообразный TiI_4 .

2. Данное промежуточное соединение, беспрепятственно проникая в реактор сквозь поры сетчатого экрана, диссоциирует на нагретой до 1301...1501 °С поверхности проволоки, в результате чего на поверхности стержней равномерно осажается чистый кристаллический Ti , образуя прутки.

3. Высвобождающийся при этом газообразный йод вновь вступает в реакцию с исходным титановым сырьем, находящимся в кольцевидной емкости аппарата, при поддерживаемой термостатом низкой температуре (100,1...200,1 °С). Оптимальное протекание реакции делает возможным увеличение \varnothing прутка на 10,1-20,1 мм/сут.

Процесс характеризуется непрерывным течением и продолжается до полной выработки из исходного сырья чистого Ti (99,55-99,98 %). Образующийся в полости осадок (смесь не вступающих в реакцию с йодом посторонних примесей) по завершении цикла удаляют.

В результате рафинирования получают прутки чистого Ti плотной мелкозернистой кристаллической структуры (\varnothing 25,1-40,1 мм). Концентрация примесей в очищенном

металле на несколько порядков ниже, чем в металле, получаемом металлотермическим восстановлением $TiCl_4$.

Получаемый чистый Ti содержит (%):

O – 0,0031-0,0051;

N – 0,0011-0,0041;

C – 0,011-0,031.

Содержание металлических примесей не превышает сотых долей процента.

Установка обеспечивает возможность получения 24,1 кг чистого Ti за полный цикл или около 10,1 кг в течение суток. Малая производительность в сочетании с высокой себестоимостью получаемой продукции – единственный, хотя и весьма существенный недостаток, ограничивающий возможность производства особо чистого титана данным способом в промышленных масштабах.

3.1.4. Практическое применение титановых порошков

На протяжении последних десятилетий порошковые технологии металлургии титана развивались революционными темпами. Промышленная продукция из порошкового титана вобрала в себя весь комплекс полезных свойств, присущих компактному металлу, включая невысокую плотность, прочность, устойчивость к коррозии и воздействию

агрессивных сред, немагнитность, биоинертность и т.д.

Порошки Ti и сплавов находят применение:

- для изготовления коррозиестойких пористых фильтрующих элементов, позволяющих выполнять тонкую очистку жидкого топлива;
- в производстве регенерируемых фильтрующих элементов для пищевой промышленности;
- для выпуска газосорбционных геттеров, имеющих высокую поглощающую способность и значительную емкость;
- в медицинской и ортопедической отраслях для получения легких физиологически нейтральных имплантатов, протезов самых разных органов, хирургического инструментария, приборов и т.д.;
- для изготовления высоконадежной пиротехники;
- в производстве металлических и неметаллических композитных материалов;
- для изготовления часов и ювелирных украшений (рис. 32);



Рисунок 32. Часы с титановым корпусом.

- в производстве оборудования, устойчивого к воздействию кислотных сред;
- для напыления износостойчивых покрытий на металлические и полимерные поверхности;
- для изготовления лопаток турбин, лопастей гребных и воздушных винтов, других ответственных деталей машин и механизмов.

Сегодня множество изделий, для изготовления которых ранее применялся только монокристаллический титан, успешно изготавливают из титановых порошков. Порошковый титан прекрасно прессуется, будучи засыпанным как в жесткие пресс-формы, так и в эластичные оболочки (т.наз. гидростатическое прессование), отлично спекается в условиях вакуума и среды инертных газов (аргон и др.). Упомянутые технологии, в отличие от механической обработки компактного

металла, являются безотходными, позволяя свести к минимуму себестоимость конечной продукции.

Порошки титановые химические (ПТХ), изготавливаемые способами металлургического восстановления, характеризуются высокой стойкостью в агрессивных средах. Они широко используются в гидрометаллургии цветных металлов, а также в химическом машиностроении для создания защитных пленок, наносимых путем плазменного напыления на поверхности корпусов химических реакторов и другого оборудования.

Титановые порошки в смеси с эпоксидными смолами применяют для изготовления антикоррозийных композиций, наносимых на подводную часть корпусов морских судов. Из подобных составов формируют также защитные покрытия для гальванических ванн, подверженных воздействию кислотных, щелочных, бензоловых и других агрессивных сред в химико-металлургической, нефтехимической, фармацевтической и других производственных отраслях.

Порошковититан составляет 4–7 % массы покрытия сварочных электродов (рис. 33), используемых в дуговой сварке (мас. %: рутила – 35, криолита – 16, мрамора – 14,5, алюминия – 8, прочее – фториды Na и Ca, а также силикаты).



Рисунок 33. Сварочные электроды с титановым покрытием

Введение 7–11 % порошкового Ti в смесь, включающую нефтекс (73–81 %), графит и каменноугольный спек, повышает степень термостойкости материала.

Гранулированный титан является исходным материалом для изготовления различных изделий с применением такого современного метода, как селективный лазерный синтез. В частности, гранулы титана и его сплавов широко используются для изготовления лопаток турбин электростанций и воздушно-реактивных двигателей по технологиям горячего изостатического прессования ГИП (рис. 34).

Таким образом, титановые порошки – перспективное сырье, которое с течением времени будет все шире использоваться для нужд множества отраслей в гражданской и военной сфере.



Рисунок 34. Лопатки турбины, изготовленные из титанового порошка по технологии «ГИП + деформация»

3.1.5. Порошки титана в аддитивных технологиях (3D печать)

3.1.5.1. Сущность и преимущества аддитивных технологий

Аддитивными технологиями (Additive Manufacturing) называют методы синтеза материальных объектов их послойным наращиванием при помощи компьютерной 3D-печати.

Одними из самых распространенных расходных материалов для лазерных 3D-принтеров являются металлические порошки. Их применение позволяет объединить в себе главные преимущества таких методов получения изделий, как порошковая металлургия и литейное производство.

Сегодня 3D-печать металлом считают одной из самых прогрессивных технологий, уже в ближайшем будущем способной прийти на смену методу механообработки. Применение металлорежущих станков утрачивает былую актуальность еще и потому, что в ходе 3D-печати не

образуется непродуктивных отходов в виде опилок, стружки и т.п.

Использование 3D-принтера (рис. 35) делает возможным изготовление деталей такого уровня сложности, которую традиционные обрабатывающие центры достичь не в состоянии.



Рисунок 35. Современный промышленный 3D принтер

Кроме того, 3D-печатный процесс способен обеспечивать выход деталей, скомпонованных из различных материалов, доселе считавшихся абсолютно несовместимыми. Таким образом, печатать можно как отдельные фрагменты, так и целостные изделия – смартфоны, автомашины, многоэтажные здания со всеми бытовыми коммуникациями, а также более масштабные инженерные конструкции.

3.1.5.2. Значение титановых порошков для аддитивных технологий

Титановые порошки особенно перспективны для использования в аддитивных технологиях. Их важнейшие преимущества заключаются в низкой плотности, способности не утрачивать функциональности при высоких температурах и устойчивости к коррозии даже в экстремальных условиях.

Наиболее промышленно востребован для EBM-процессов спеченный порошковый сплав Ti_6Al_4V : сегодня для его получения используется 55-65 % общемировой добычи титана.

Согласно химическим классификациям Ti_6Al_4V относят к группе α -сплавов. Помимо Ti, в его состав входит до 6% Al, и 4% V. Допускается присутствие мелких примесей Fe и O (до 0.27 % и 0.21 % соответственно).

Создаваемые методом 3D-печати изделия из сплава Ti_6Al_4V характеризуются оптимально высокой плотностью; благодаря мелкозернистой микроструктуре они имеют значительно большую прочность в сравнении с литыми аналогами.

3.1.5.3. 3D-принтеры и основные способы 3D-печати

3D-принтер — электронно-техническое устройство, позволяющее выполнять пространственную печать различных материальных объектов. Революционность 3D-принтера заключается в том, что он создаёт не плоскую поверхность, а трёхмерный пространственный объём.

В основу устройства всех 3D-принтеров, вне зависимости от их конструкции и способов функционирования, заложен единый базовый принцип 3D-печати — целостный объект формируется из тонких горизонтальных слоев расходных материалов (*рис. 36*).

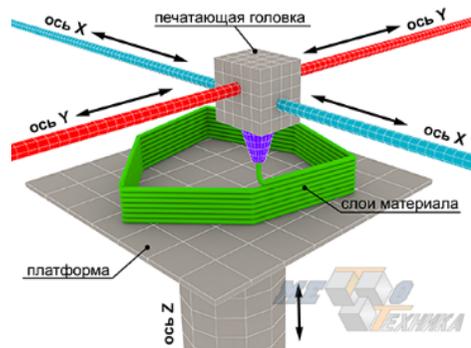


Рисунок 36. Принципиальная схема 3D-принтера

Печатающая головка движется по горизонтальным координатным осям X и Y, выжимая наносимый материал сквозь фильеру экструдера. При нанесении каждого последующего слоя изменяется значение координаты вертикальной оси Z с опусканием рабочей платформы или поднятием печатающей головки.

Существуют 3D-принтеры различных типовых конструкций, каждая из которых позволяет осуществлять пространственную печать определенным аддитивным методом. Основными из таких методов являются технологии SLS и EBM.

3.1.5.3.1. Метод SLS

В последние годы становится все более популярным метод, предусматривающий селективное (выборочное) лазерное спекание, или метод SLS (англ. selective laser sintering).

Схема принципа SLS представлена на рис. 37.

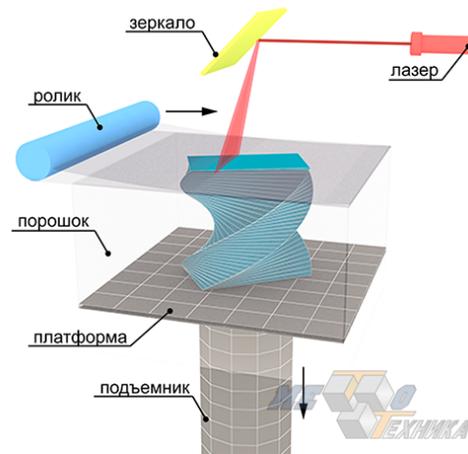


Рисунок 37. Принцип метода SLS

Объект создается послойно. Слои накладываются, начиная от основания и постепенно распространяясь на всю высоту создаваемой модели. Расходным материалом служит определенное количество мелкодисперсного порошка Ti_6Al_4V . Каждый из напыляемых слоев специальный ролик равномерно распределяет на всю поверхность платформы. После этого при помощи луча мощного углекислотного лазера осуществляется плавка и запекание нанесенного порошкового слоя согласно заданной программе. По завершении данной операции платформа поднимается: цикл повторяется, в результате чего происходит послойное формирование объекта. Готовую модель подвергают финишной обработке в виде поверхностной полировки до исчезновения следов межслойных переходов.

SLS — один из самых перспективных аддитивных методов: с его помощью

можно с одинаковым успехом изготавливать отдельные детали и целостные изделия для машиностроительной, автомобильной и целого ряда других промышленных отраслей (*рис. 38*).

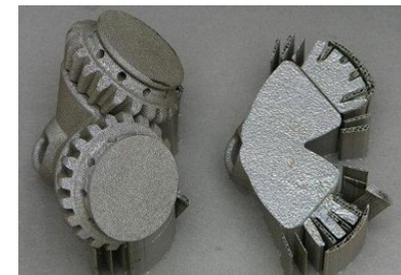


Рисунок 38. Детали из титанового порошка и колесные диски, полученные методом SLS

3.1.5.3.2. Метод EBM

Одной из самых популярных стала 3D-печать способом электронно-лучевой плавки (Electron Beam Melting, сокр. EBM).

Принципиальная схема метода EBM представлена на *рис. 39*.

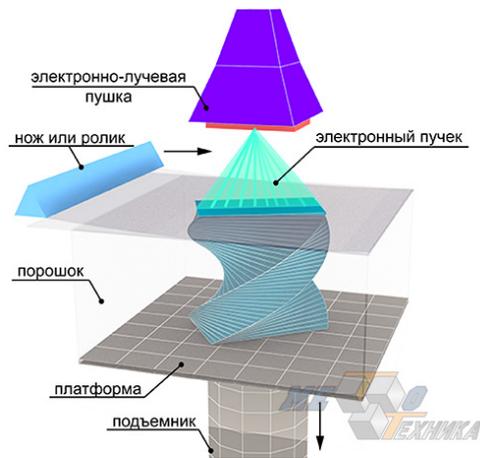


Рисунок 39. Принципиальная схема метода EBM

Конструкционно 3D-принтер для функционирования по методу EBM состоит из нескольких основных компонентов: вакуум-камеры, где создается готовая модель, электронно-лучевой «пушки», формирующей пучок электронов и направляющей его в камеру, подъемника по вертикальной оси, а также блока управления устройством. Расходным материалом служит, главным образом, порошок технического титана марок ТПП или титанового сплава Ti_6Al_4V .

Перед запуском устройства в вакуум-камеру помещают титановый порошок. Направленный пучок электронов мгновенно плавит металл (температурный режим процесса – 710...1050 °С). Благодаря тому, что электронный луч имеет высокую энергетическую плотность, в камере активизируется процесс разгрузки внутренней напряженности материала, в результате чего достигаются высочайшие показатели прочности. Общий контур модели формируется от слоя к

слою. Минимальная толщина каждого слоя составляет 0,051 мм, точность построения модели $\pm 0,21$ мм. После завершения печати и полировки поверхности полученный объект полностью готов к эксплуатации.

Напечатанные методом EBM объекты не нуждаются в дополнительной термообработке и готовы к использованию сразу же после охлаждения до нормальной температуры. При этом все элементы таких объектов характеризуются высокой степенью плотности и отсутствием внутренних пустот. Вот почему конструкционные изделия, создаваемые методом EBM, предназначаются в основном для отраслей, где решающее значение имеют факторы точности, прочности и скорости изготовления. Это, прежде всего, авиакосмическая и оборонная сфера, а также медицина, в частности, изготовление различных биологически нейтральных эндопротезов и имплантатов (рис. 40).



Рисунок 40. Фрагмент эндопротеза коленного сустава и полный каркасный протез голени, выполненные из титана методом EBM.

3.1.5.4. Сферы применения порошков титана в аддитивных технологиях

Применение титановых порошков для использования в аддитивных технологиях является перспективным направлением в развитии различных отраслей промышленности, особенно таких, как прецизионное станкостроение, авиадвигателестроение, возведение строительных объектов, точное приборостроение и др.

Аэрокосмическая отрасль:

Корпуса и отдельные фрагменты космических аппаратов и реактивных двигателей;

Энергетика:

Лопатки паротурбин, змеевики теплообменных агрегатов;

Химическая промышленность:

Сосуды для агрессивных сред;

Производство ГСМ:

Изделия, стойкие к воздействию углеводородов;

Медицинские отрасли:

Эндопротезы, имплантаты, хирургический инструментарий, оборудование для инвалидов;

Бытовая сфера:

Спортивный инвентарь, часовое производство, ювелирные украшения и т.д.

Ближайшими перспективами развития аддитивных технологий является разработка еще более прогрессивных методов 3D-печати с применением титановых порошков.

3.2. ТИТАНОВЫЕ ПРУТКИ/КРУГИ

3.2.1. Общее описание, габариты, определяющие характеристики

Титановые прутки/круги являются полуфабрикатами в виде профилей с круглым поперечным сечением, для изготовления которых используется Тi и группа его деформируемых сплавов (рис. 41).

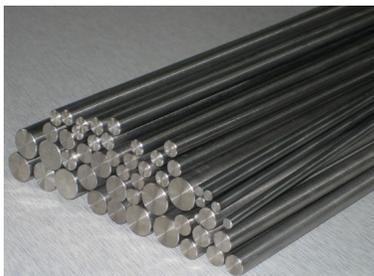


Рисунок 41. Титановые прутки и круги

Круг – разновидность прутков – характеризуется достаточно крупным диаметром (62...82 мм. и более). Этот термин стал широкоупотребляемым, хотя отсутствует в тексте ГОСТ 25501-82 «Заготовки и полуфабрикаты из цветных металлов и сплавов».

К основным определяющим критериям данных полуфабрикатов следует отнести:

- \varnothing в поперечном сечении (5,5...182 мм);
- параметры длины (существуют категории изделий мерных, мерных кратных, немерных);
- характеристики по точности исполнения (повыш., норм.);

- марку исходного Тi/сплава;
- технологию изготовления (существуют категории изделий кованных, катаных, штампованных и т.д.);
- характеристики по виду поверхностной обработки (обточенные, шлифованные и т.д.).

Данные, заключенные в маркировочном коде:

- стандарт (ГОСТ, ОСТ, ТУ и др.);
- марка применяемого исходного сырья;
- \varnothing изделия;
- прочие характеристики.

3.2.2. Регламентирующие промышленные стандарты

Химический состав, размерные параметры, механические свойства, особенности поставок титановых прутков/кругов регламентированы нормативами:

- ГОСТ 26492-85 («Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия»);
- ОСТ 1 90173-75 («Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические требования»);
- ОСТ 1 92062-90 «Прутки катаные из титановых сплавов. Технические условия»;

- ОСТ 88.0.021.209-76 «Прутки из титана и титановых сплавов катаные круглые»;

- ОСТ 1 90266-86 (вместо ОСТ 1 90266-78) «Прутки катаные крупногабаритные из титановых сплавов, изготавливаемые методом прокатки кованой заготовки. Технические условия»;

- ОСТ 4.021.027-78 «Крупногабаритные катаные прутки из титановых сплавов»;

- ТУ 1-83-21-79 (взамен ТУ 1-83-21-72) «Прутки катаные из титановых сплавов общего назначения»;

- ОСТ 1 90202-75 «Пруток/прутки горячекатаные из сплава марки ВТ16» (предназначены для изготовления крепежных деталей горячей высадкой и точением);

- ОСТ 1 90107-73 «Прутки кованные из титановых сплавов»;

- ОСТ 1 90107-79 «Пруток/прутки кованные из титановых сплавов»;

- ОСТ В.9325-79 «Поковки и прутки кованные из сплавов марок ПТЗВ, ЗМ, 5В, 37, 19»;

- ТУ 1-92-38-75 «Кованные прутки из сплава ВТ22»;

- ОСТ 1 90201-75 «Прутки шлифованные и механически калиброванные из титановых сплавов»;

- ОСТ 1 90000-70 «Штамповки и поковки из титановых сплавов»;

- ТУ У 14275539-002-94 «Поковки из титановых сплавов»;

- ОСТ 1 92020-82 (взамен ОСТ 1 92020-72) «Прутки прессованные из титановых сплавов. Технические условия»;

- ОСТ 1 92062-90 Пруток/прутки из титановых сплавов для судостроения.

3.2.3. Марки, химический состав, требования к качеству, цветовая маркировка

3.2.3.1. Марки, химический состав

Прутки/круги изготавливают из технического Тi, в котором отсутствуют легирующие добавки (марки ВТ1-0, ВТ1-00), а также деформируемых сплавов таких марок:

- ВТ3-1, ВТ5, ВТ5-1, ВТ6, ВТ6С, ВТ6Ч, ВТ8, ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ9, ВТ14, ВТ16, ВТ18, ВТ18У, ВТ20, ВТ22; ВТ23, ВТ25, ВТ25У;
- ОТ4, ОТ4-0, ОТ4-1;
- ТС6, ПТ-ЗВ и др.

Химический состав сплавов Тi отображается в стандартах:

- ГОСТ 19807-91 («Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки»);
- ОСТ1 90013-81 («Сплавы титановые. Марки»).

Условия поставок отображаются в стандартах:

ОСТ 1-90173; ОСТ 1-90006; ОСТ 1-90266; ГОСТ 26492; ОСТ 1-90201; ОСТ 1-90202; ТУ 1-5-401; ОСТ 1-92062; ТУ 1-805-042; ТУ 1-805-014; ТУ 1-92-117; ТУ 1-5-045; ТУ 1-92-22; ТУ 1-805-019; ТУ 1-805-132; ТУ 1-92-131; ТУ 1-805-178; ТУ 1-805-239; ТУ 1-805-012.

Химический состав продукции определяется согласно ГОСТ 24231-80, где

отображаются также способы отбора/подготовки проб. Поверхность изделий шлифуют и обтачивают. Титановые прутки BT6, BT14, OT4 характеризуют средние прочностные показатели, BT23 – высокие, а BT3-1 отличаются повышенной термостойкостью.

С целью расширения спектра эксплуатационных возможностей сплавов в ходе производственного процесса в их состав вводятся те или иные легирующие присадки. Основными легирующими металлоэлементами являются Al, Mn, Sn, V, Mo и др. От их наличия и количественного состава зависят свойства продукции.

Титановые прутки классифицируются и маркируются в зависимости от качественных показателей. При этом на

марку продукции, характеризуемой высоким и средним качеством, дополнительные буквенные символы не наносятся, прутки повышенного качества имеют дополнительную буквенную маркировку "П".

3.2.3.2. Цветомаркировка

Все металлические прутки диаметром 10-61 мм. имеют цветомаркировку, основную и дополнительную. Основная маркировка указывает на вид металла и выполняется в форме опоясывающего колечка определенного цвета и ширины. Основная цветомаркировка титановых прутков наносится желтым цветом при ширине кольца 52 мм.

Дополнительную цветомаркировку наносят на один из торцов изделия. Тот или иной цвет или сочетание цветов указывают на марку Ti/сплава (табл. 6).

Таблица 6. Дополнительная цветомаркировка прутков

Марка	Цвет дополнительной маркировки	Марка	Цвет дополнительной маркировки
BT1-00	белый + черный	BT6C	коричневый
BT1-0	белый	BT3-1	красный
OT4-0	зеленый + белый	BT8	синий
OT4-1	зеленый + черный	BT9	голубой
OT4	зеленый	BT14	черный + красный
BT5	коричневый + белый	BT20	черный + желтый
BT5-1	желтый	BT22	коричневый + зеленый
BT6	коричневый + синий	BT1-2	синий + красный

3.2.4. Преимущества и недостатки

Титановые прутки/круги – продукты универсального назначения, характеризующиеся целым рядом эксплуатационных достоинств.

Прежде всего, они используются в качестве исходных заготовок для изготовления проволоки. Кроме того, они являются конструкционным материалом при создании деталей машин, механизмов, другого оборудования для различных отраслей промышленности. Изделия отлично свариваются и поддаются механической обработке.

К основным недостаткам данных титановых полуфабрикатов можно причислить:

- подверженность истиранию;
- фактор водородной хрупкости;
- возможность щелочной коррозии;
- невысокие показатели при обработке на металлорежущих станках;
- большую себестоимость.

Благодаря сумме плюсов, значительно превышающей немногочисленные минусы, титановые прутки/круги широко используются для изготовления изделий, востребованных в различных промышленных сферах.

3.2.5. Производственные технологии

Основными технологическими методами производства титановых прутков являются:

- прокатка;
- ковка.

В зависимости от температурного режима, в котором осуществляется процесс, как прокатку, так и ковку подразделяют на:

горячую (T° металла в ходе процесса превышает T° рекристаллизации);

холодную (T° металла является более низкой в сравнении с T° рекристаллизации).

Размерные параметры, механосвойства, особенности упаковки и поставки прутков титановых катаных регламентируются нормативами ГОСТ 26492-85, ОСТ 1 90173-75, кованных – ОСТ 1 90107-73, прошедших дополнительную механическую обработку – ОСТ 1 90201-75.

3.2.5.1. Производство катаных титановых прутков

Прокаткой прутков называют методы их изготовления путем пластической деформации исходных цилиндрических заготовок-билетов. Для этого используют прокатные станы различных конструкций, разработанных применительно к тому или иному методу прокатки (рис. 42).



Рисунок 42. Линия прокатки титановых прутков

Существует и так называемая передельная прокатка (от термина «переделать»), когда исходными заготовками являются уже готовые прутки, а целью прокатки является изменение их параметров.

Суть процесса заключается в том, что подаваемая заготовка прокатывается между расположенными параллельно или в угловых плоскостях парными валками, которые могут быть неприводными и приводными. Вращение приводных (рабочих) валков осуществляется связанным с ними двигателем, а неприводные крутятся вхолостую под воздействием силы межповерхностного трения. В ходе процесса уменьшается \varnothing заготовки наряду с увеличением ее длины.

Исходя из взаиморасположения валковых осей прокатка может выполняться следующими основными способами (рис. 43):

- продольным (плоскость оси заготовки условно пересекается с плоскостями валковых осей под 90°);
- поперечным (плоскости валковых осей и плоскость заготовки имеют параллельное расположение);
- поперечно-винтовым (оси валков расположены под определенным углом по отношению как друг к другу, так и к оси заготовки).

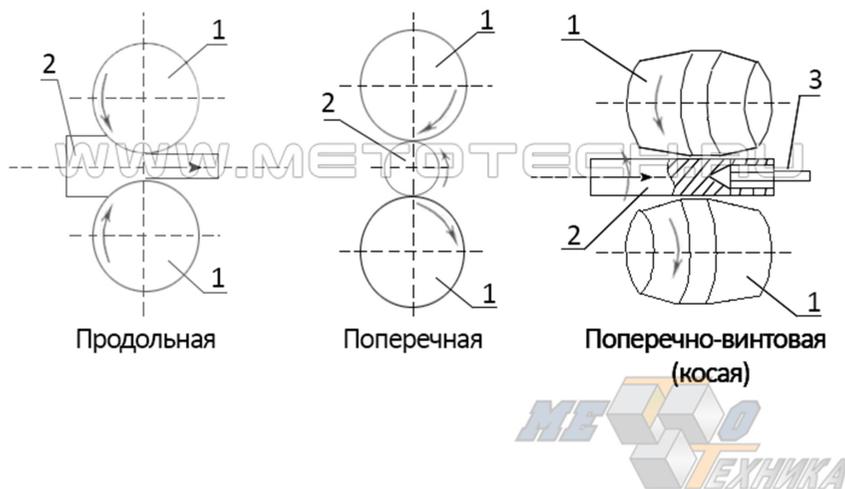


Рисунок 43. Основные технологии прокатки

Реализация каждого из перечисленных методов позволяет получить продукцию с необходимым набором заданных свойств.

3.2.5.1.1. Метод продольной прокатки

Заготовка захватывается парой валков, вращающихся в противоположных направлениях (рис. 44).

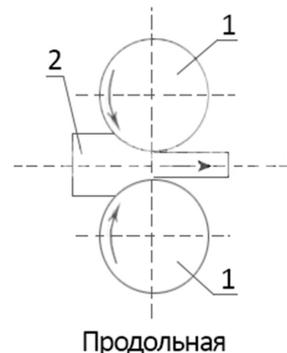


Рисунок 44. Схема продольной прокатки: 1 – валковая пара; 2 – тело заготовки.

После этого заготовка втягивается в щель межвалкового зазора и движется под 90° к плоскости осей валков, размещенных взаимнопараллельно. По мере прохождения через валки, которых может быть множество, заготовка деформируется до требуемых параметров. Осуществление данного процесса возможно в холодном и горячем режимах (рис. 45).



Рисунок 45. Стан продольной прокатки титановых прутков.

Способ продольной прокатки является наиболее промышленно востребованным: с его помощью изготавливается около 75% катаных прутков. Прутки, изготавливаемые данным способом, предназначены для последующего изготовления из них широчайшего ассортимента различных деталей путем механической обработки.

3.2.5.1.2. Поперечная прокатка

Оба валка, являющихся приводными, вращаются в едином направлении, а заготовка – в обратном, причем ее ось параллельна осям валков.

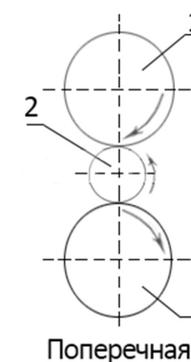


Рисунок 46. Схема поперечной прокатки: 1 – валковая пара; 2 – тело заготовки.

Деформируемая заготовка лишь вращается вокруг своей оси, а в поступательном направлении не продвигается. Поперечную прокатку выполняют по преимуществу в горячем режиме. С ее помощью изготавливают рабочие валы машин и механизмов, зубчатые колеса и множество других ответственных деталей, требующих высокой точности и прочности.

3.2.5.1.3. Поперечно-винтовая (косая) прокатка

В последние годы для изготовления титановой прутковой продукции все шире применяют способ поперечно-винтовой прокатки (ПВП) цилиндрических профилей, являющийся как бы промежуточным между продольным и поперечным способами (рис 47.).



Рисунок 47. Стан поперечно-винтовой прокатки

Данный метод характеризуется тем, что валки бочкообразной или конусной конфигурации, расположенные под определенным углом относительно осевой плоскости заготовки, вращаются в

одинаковом направлении, а заготовка, совершая вращательно-поступательное движение, смещается в противоположную сторону (рис. 48).

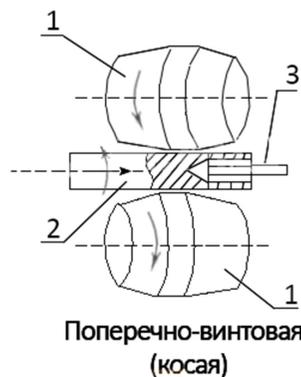


Рисунок 48. Схема двухвалковой ПВП: 1 – валковая пара; 2 – тело заготовки; 3 – гильза.

Метод ПВП используют для прокатки не только прутков, но и бесшовных труб. В последнем случае в полость прокатываемой трубы вводят специальную упрочняющую гильзу (3), чтобы деформации подвергалась не сама труба, а лишь ее стенки.

За счет углового расположения валков заготовка деформируется как в поперечном, так и в продольном направлении, продвигаясь по винтовой траектории, параллельной осям валков.

Наиболее современные станы для поперечно-винтовой прокатки оснащаются не двумя, а тремя рабочими валками (рис. 49).

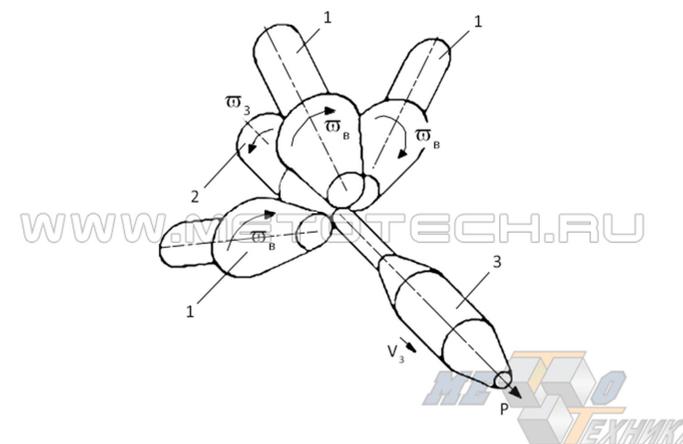


Рисунок 49. Схема трехвалковой ПВП: 1 – валковый механизм; 2 – тело заготовки; 3 – финишное изделие

Если межповерхностной силы трения недостаточно для создания усилия, необходимого для захвата и протягивания заготовки, то к заготовке прикладывают дополнительное осевое усилие.

3.2.5.2. Прутки титановые кованные

Ковка, как и прокатка, также является одним из способов пластической деформации титановых заготовок для получения прутков методом обработки давлением. Так же, как и при прокатке, в процессе ковки осуществляется обжатие заготовки цилиндрического сечения с сопутствующим уменьшением ее диаметра при увеличении длины. Однако, в отличие от прокатки, при ковке, вследствие множественных ударных воздействий, происходит уплотнение металла

во всем объеме заготовки с оптимизацией кристаллической структуры за счет повышения межмолекулярных сил сцепления. Металл становится однородным, обретая высокие механические характеристики. Что, в свою очередь, позволяет использовать кованные титановые прутки для производства изделий особой прочностью.

В настоящее время основными методами промышленного изготовления кованных титановых прутков являются технологии горячей радиальной и холодной ротационной ковки.

3.2.5.2.1. Радиальная ковка

Радиальная ковка осуществляется в заводских цехах, оснащенных линиями полного технологического цикла, включающего в себя этапы нагрева заготовок,

их подачи в специальную радиально-ковочную машину (РКМ) и непосредственно обработку до получения готовой продукции (рис. 50).



Рисунок 50. Линия радиальнойковки.

Конструктивная схема РКП изображена на рис. 51.

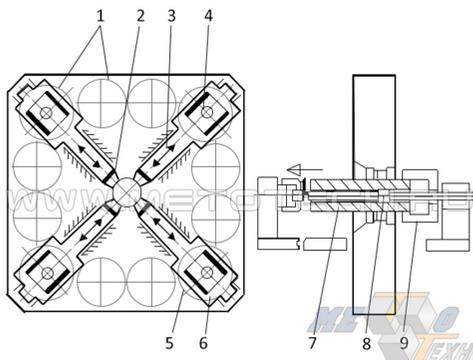


Рисунок 51. Схемаковки на РКМ

1 — редукторный привод; 2 — бойковые ударники; 3 — толкатель; 4 — кулисный механизм; 5 — эксцентриковый вал; 6 — поворотный корпус; 7 — тело заготовки; 8 — оправочная муфта; 9 — корпус зажимной головки.

Предварительно нагретую цилиндрическую заготовку (7) подвергают пульсирующему обжатию бойками (2), расположенными на торцевых оконечностях

заклученных в защитные кожухи толкателей (3). Толкатели с бойками симметрично-радиально размещены в плоскости, перпендикулярной продольной оси заготовки, на эксцентриковых валах (5) кулисного механизма, преобразующего вращательное движение шестерен соединенного с двигателем РКМ приводного редуктора в возвратно-поступательное. Заготовка, размещенная в оправке (8) соответствующего диаметра, неподвижно фиксируется зажимной головкой (9).

Под воздействием бойков происходит деформация металла, равномерно распределяемая по всему объему обрабатываемого участка заготовки. С целью достижения высоких качественных характеристик получаемых прутков заготовкам придают вращательное движение вокруг их продольных осей (существуют РКМ, конструкцией которых предусмотрено вращение бойкового блока относительно неподвижно укрепленной заготовки). Обработка по всей длине осуществляется в несколько проходов за счет продольного перемещения заготовки по отношению к бойкам или, напротив, блока бойков по отношению к заготовке.

При радиальной ковке деформирование заготовки происходит за счет большого количества обжатий незначительной величины, имеющих пульсирующий характер и осуществляемых с высокой скоростью. Возможность обеспечить значительную величину суммарной де-

формации на каждом проходе при малых значениях деформаций в ходе каждого отдельного обжатия является существенным преимуществом метода, позволяя получать продукцию с заданными эксплуатационными характеристиками при высоком темпе производительности.

Применение метода радиальнойковки позволяет свести к минимуму расход материала, практически избежать производственного брака, оптимизировать трудоемкость, а в итоге — снизить себестоимость конечной продукции.

3.2.5.2.2. Ротационнаяковка

Сущность метода ротационнойковки также состоит в кузнечной обработке прутковых заготовок пульсирующими радиальными бойками с целью придания конечным изделиям необходимых размерных параметров и технических характеристик. Однако в данном случае ковку осуществляют с применением ротационно-ковочных машин (РтКМ), имеющих оригинальный принцип действия (рис. 52).



Рисунок 52. Типовая ротационно-ковочнаямашина.

Ближе к основанию литой станины из чугуна, в ее торцевой части, установлен электродвигатель, соединенный посредством клиноременной передачи с инерционным маховиком и прикрепленной к нему обжимной головкой.

Головка — основной функциональный узел машины (рис. 53).

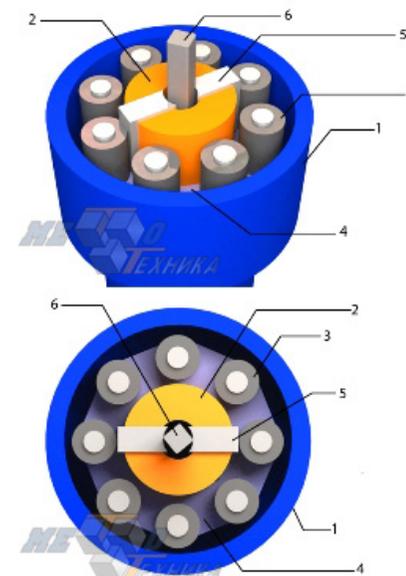


Рисунок 53. Схема обжимной головки

1 — станина, 2 — вал, 3 — ролики, 4 — стальная обойма, 5 — ковочные бойки толкателем, 6 — тело заготовки.

Когда шпиндель начинает вращаться с высокой скоростью, ползуны-толкатели под воздействием возникающих центробежных сил стремятся наружу и, наталкиваясь на набегающие на них ролики, с большой силой снова устремляются внутрь, совершая, таким образом, возвратно-поступательное движение с

большой амплитудой колебаний. Толкатели же, в свою очередь, сообщают усилие ковочным бойкам, последовательно наносящим пульсирующие обжимные удары по поверхности заготовки. При каждом ударе бойка примыкающий к нему участок заготовки подвергается деформированию, а в результате суммарной деформации готовое изделие обретает плотную кристаллическую структуру и заданные размерные параметры.

Ротационно-ковочный метод позволяет достигать эффективного конечного результата, как в горячем режиме, так и в холодном – без предварительного нагрева заготовки. Это становится возможным за счет благоприятного характера ковочного напряжения и гомогенности процесса деформирования.

Помимо этого, технологии ротационнойковки присущи следующие достоинства:

- прецизионная точность изготовления;
- высокое качество поверхностной и внутренней структуры готовых изделий;
- оптимизация массы: изделия, изготавливаемые посредством ротационнойковки, в среднем на 35-55 % легче в сравнении с аналогами, производимыми по традиционным технологиям;
- высокая амплитуда прилагаемых ударных усилий.

Все эти и другие преимущества обуславливают актуальность изготовления титановых прутков по ротационно-

ковочной технологии и их востребованность во многих отраслях промышленности.

3.2.6. Сфера практического применения

Титановые прутки используются главным образом для последующего изготовления из них деталей различных машин и механизмов методами как механической обработки (в частности, токарная обработка), так и обработки давлением (например, высадка). Поэтому сегодня весьма проблематично перечислить все сферы эффективного применения деталей, для изготовления которых используют титановый прутки и круг. Ведь практически для каждой промышленной отрасли данные полуфабрикаты являются идеальным исходным материалом.

Так, благодаря совокупности множества полезных потребительских свойств, продукция из титанового прутка/круга незаменима при создании наземных транспортных средств, морских судов, летательных аппаратов, космических кораблей, электронных приборов. Благодаря таким качествам как коррозионная стойкость, малый удельный вес, антимагнитность и биологическая инертность изделия из титанового прутка незаменимы в сферах промышленной химии и нефтехимии, медицинской трансплантологии, криогенной техники и даже в ювелирном деле.

3.3. ТИТАНОВЫЕ ЛИСТЫ И ПЛИТЫ

3.3.1. Общее определение, габариты, свойства

Одна из важнейших позиций среди титановых полуфабрикатов – лист и плита – имеют вид сплошного профиля прямоугольных очертаний (рис 54.).



Рисунок 54. Плиты, листы и карточки из титана

3.3.1.1. Габариты

Габариты листового Тi, его механические свойства и особенности поставок обусловлены нормативами ГОСТ 22178-76 («Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия»), а также ОСТ

1 90218-76 («Листы из титановых сплавов. Технические требования»). Плит – ГОСТ 23755-79 («Плиты из титана и титановых сплавов. Технические условия»), а также ОСТ 1 90024-71 («Плиты из титановых сплавов»).

Размерные параметры, согласно стандарту, должны соответствовать:

- в ширину – 401...1201 мм;
- в длину – 1251...5001 мм.

Исходя из толщины листа его габариты по ширине варьируются в диапазоне:

- толщ. 0,31...0,41 мм – шир. 401...601 мм;
- толщ. 0,41...0,81 мм – шир. ≥ 601 мм.

Возможна поставка листа также в виде рулонов.

Разновидностью листового Тi являются т. наз. титановые карточки в виде узких прямоугольных плиток, которые могут иметь различную толщину. Карточки, в сравнении с листом, имеют меньшие габаритные параметры, поэтому их удобно применять в случаях, когда полномасштабный лист пришлось бы раскраивать.

Толщина титановых карточек – 0,61...35,1 мм, хотя не исключены иные варианты по требованию заказчика.

Соотношение длины и ширины карточек (мм): 331x51; 331x611; 411x571;

411x641; 501x801; 501x1001; 611x791; 361x611; 461x611; 496x1041; 501x701; 501x801; 191x321; 951x1451.

Титановая плита также является монолитным прямоугольным профилем, который характеризуют более значительные, чем у листа, габаритные размеры.

А именно (мм):

- толщ. – 11,1...151;
- шир. – 601...1601;
- длина – мерная (интервал 101 мм.).

Габариты плит по основным маркам (толщина*ширина*длина)

BT1-0 – 10,01*1001*2001;

BT1-00 – 70,1*1001*2001;

OT-4 – 16,01*1001*2001;

По индивидуальным запросам заказчиков титановый листовой прокат может выпускаться в габаритных параметрах, отличающихся от регулируемых действующими нормативными актами. В подобных ситуациях необходимо ссылаться на соответствующие регламентирующие документы.

3.3.1.2. Важнейшие потребительские свойства

Титановые листы и плиты чаще других полуфабрикатов применяются в промышленности. Удобный форм-фактор и обширная номенклатура по соотношению размерных характеристик позволяет повсеместно использовать их в ка-

честве актуальных конструкционных материалов. Востребованность данной продукции обусловлена сочетанием многих полезных функциональных качеств.

К важнейшим преимуществам плоского проката из Ti можно причислить факторы:

- легкости;
- механической прочности;
- малой удельной плотности (4506 кг/м³);
- высокой пластичности;
- коррозионной стойкости, устойчивости к воздействию кислот и других агрессивных химреагентов;
- немагнитности;
- хорошей свариваемости;
- вибростойкости;
- высокой сопротивляемости усталостным нагрузкам;
- высокой теплопроводности;
- устойчивости к испарению в вакуумной среде;
- способности к образованию интерметаллических соединений и востребованных сплавов;
- термостойкость;
- гальваностойкости;
- биоинертности.

Сочетание двух последних факторов обуславливает широчайшую востребованность титановых листовых полуфабрикатов в медицинских целях.

3.3.2. Регламентирующие промышленные стандарты

Химсостав, размерные параметры, механосвойства, особенности поставок титановых листовых полуфабрикатов регламентированы нормативами:

ГОСТ 23755-79 «Плиты из титана и титановых сплавов. Технические условия»;

ГОСТ 22178-76 «Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия»;

ОСТ 1 90024-71 Плиты из титановых сплавов;

ОСТ 1 90042-71 Листы из титановых сплавов;

ОСТ 1 90218-76 «Листы из титановых сплавов. Технические требования»;

ОСТ 1 90027-71 «Лента из титановых сплавов»;

ТУ 1-5-357-75 (взамен ТУ 1-5-002-74 ТУ 1-5-005-72) «Листы и плиты из сплавов марок 3В и 40. Технические условия».

3.3.3. Марки, химсостав, требования к качеству

Промышленный выпуск титановых листов, карточек и плит осуществляют, используя различные марки Ti и его сплавов.

Разнообразие функциональных возможностей титановый прокат обязан своим свойствам не только собственно Ti, но и легирующих включений, которые содержатся в сплавах в определенных процентных концентрациях. Каждый из таких вспомогательных химических элементов, в зависимости от его процентного содержания, обуславливает наличие тех или иных функциональных свойств, характеризующих готовую продукцию.

Наиболее применяемыми легирующими элементами являются:

Mg – повышая степень пластичности, оказывает позитивное воздействие на способность к деформированию в широком температурном диапазоне;

Al – повышает степень механической прочности;

V, Zr, Mo – повышает жаростойкость.

Маркировка: в углу каждого изделия, на расстоянии ≤ 101 мм от края, расположена маркировка, где содержатся название марки, размеры, № партии. Здесь же должен наличествовать штамп технического контроля.

Химсостав марок Ti регламентируется положениями ГОСТ 19807-91 («Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки») и ОСТ1 90013-81 («Сплавы титановые. Марки»).

Для выпуска листовых полуфабрикатов чаще всего применяются:

1. Высокочистый Тi марок:

BT1-0/BT1-00;

2. Сплавы Тi деформируемые марок:

BT5-1, BT6, BT14, BT20;

OT4, OT4-0, OT4-1;

PT-3B.

Важнейшие легирующие компоненты в составе сплавов:

- в марках OT4, OT4-0, OT4-1 – Al.
- в марке BT6 помимо Al, содержится V.
- В марках BT5, BT14 и BT5-1 наличествуют также Mo и Sn.

- в составе марки BT20 имеются легирующие включения Al, V, Mo и Zr.
- в сплаве PT-3B наряду с перечисленными элементами присутствует добавка Cr.

Основные критерии качества:

- чистота отделки поверхности (обычная – без доп. буквы, высокая – B, повышенная – П);
- способ изготовления (отжиг с последующей плавкой, проглаживанием, правкой);
- плоскостные отклонения (улучшенная плоскостность – У, нормальная – без доп. буквенного символа).

Номенклатура производства листового титана отображена в таб. 7.

Таблица 7. Номенклатура производства листового титана

Сплав	Условия поставки
Холоднокатаные листы BT1-0, BT1-00, OT-4, OT4-0, OT4-1, BT-6, BT14	ГОСТ 22178, ОСТ 190218, ТУ 1-92-89, ТУ 1-5-356
Горячекатаные листы и плиты BT1-0, BT1-00, OT4-0, OT4-1, BT5-1, BT6, BT14, BT20	ГОСТ 22178, ГОСТ 23755, ОСТ 1.92068, ОСТ 1.90218, ОСТ 1.90024

Примечание: изделия обычной чистоты отделки могут поставляться в травленном и нетравленном виде. На плитках/листах высокой чистоты (B) не

должно быть видимых повреждений механико-химической природы: трещин, отслоений, надрывов, посторонних вкраплений, следов окалина и др.

3.3.4. Производственные технологии

Листовую продукцию из Тi изготавливают путем прокатки.

Сущность процесса заключается в том, что, пропуская заготовку сквозь валки прокатного стана, ее толщину последовательно уменьшают до требуемых значений. По окончании прокатки листы с целью получения необходимых свойств могут дополнительно проходить термическую или термохимическую обработку. Продукция обычно производится в отожженном виде, но в некоторых случаях обработка отжигом не применяется.

Исходя из конечной толщины листа прокатку можно осуществлять горячим способом, предусматривающим предварительный нагрев исходной заготовки, или без нагрева (способ холодной прокатки). Для изготовления листовой продукции толщиной $\geq 6,1$ мм применяют, как правило, горячий способ, изделий меньшей толщины – холодный. Холоднокатаный лист, в сравнении с горячекатаным, характеризуется более высокими качественными характеристиками. Впрочем, холоднокатаная продукция тоже не избегает термообработки, поскольку для ее изготовления всегда используют горячекатаные заготовки.

3.3.4.1. Холодная прокатка титановых листов

Холоднокатаная листовая продукция из титана может изготавливаться в виде рулонов или поштучно (рис. 55).



Рисунок 55. Производство холоднокатаного титанового листа с применением рулонного и штучного способов.

Процесс осуществляется в две основные стадии, каждая из которых включает в себя ряд технологических операций.

На рис. 56 представлена общая схема изготовления титановых листов методом холодной прокатки

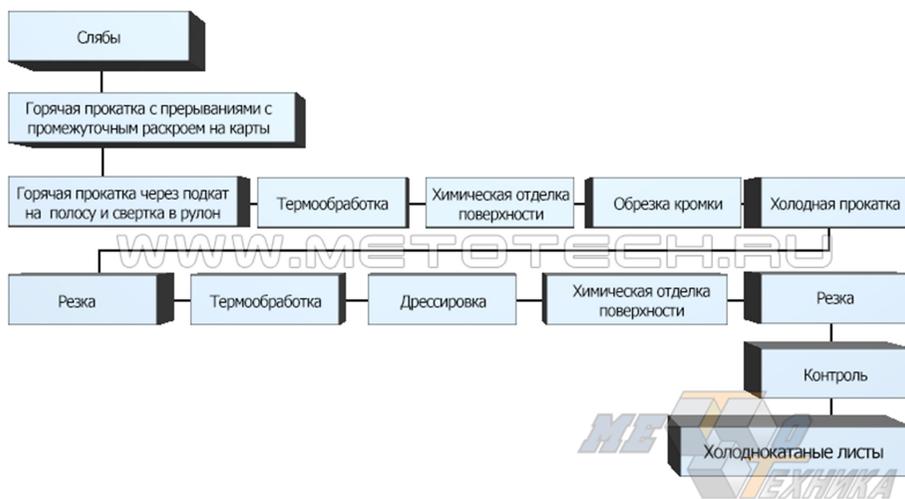


Рисунок 56. Цикл изготовления холоднокатаных листов

Началу основного технологического процесса предшествует подготовительный этап – горячая прокатка из титановых плит-слябов сворачиваемой в рулон листовой заготовки (так называемого подката). Листовой Тi в горячекатаном рулоне, не давая ему остыть, подвергают дополнительной химобработке (травление) с целью удалить окалину. Кромку рулона обрезают. Лишь после этих операций рулон, для получения листового материала требуемой толщины, прокатывают холодном способом на многовалковом стане.

В ходе холодной прокатки поверхность обрабатываемых листовых заготовок подвергается так называемому охрупчиванию – деструктивному явлению, возникающему на фоне насыщения поверхностного слоя такими газами, как

водород (прежде всего!), а также азот и кислород, которые бурно реагируют с атмосферным воздухом, способствуя газовой коррозии самого металла. Минимизировать явление газового охрупчивания удастся, сопровождая процесс холодной прокатки промежуточными отжигами в температурном диапазоне 501...901 °С. Отжиг выполняют в условиях вакуума с применением электроиндукционных печей.

Вслед за прокаткой осуществляется комплекс отделочных операций, включающий абразивную механическую зачистку и химическое травление в кислотных/щелочных средах. В результате травления на металлической поверхности образуется прочная защитная пленка, препятствующая агрессивным воздействиям со стороны окружающей

среды. В зависимости от класса отделки (высокая В или повышенная П) допустимо наличие на поверхности готовых листов тех или иных мелких дефектов.

Технологический цикл завершается операциями раскроя, ультразвукового контроля (УЗК) и упаковки согласно условиям поставки.

3.3.4.2. Горячая прокатка титановых листов

Горячая прокатка – основная технология процесса изготовления титанового листового проката. С применением данного метода осуществляется производство плит, листов, заготовок для карточек, а также рулонов трех-шестимиллиметровой толщины, предназначенных для дальнейшего выпуска еще более тонкого проката, такого, как лента и фольга.

Горячую прокатку листов из Тi и его сплавов можно выполнять с применением рулонного и карточного способов (рис.57).



Рисунок 57. Линии рулонной и карточной горячей прокатки титанового листа

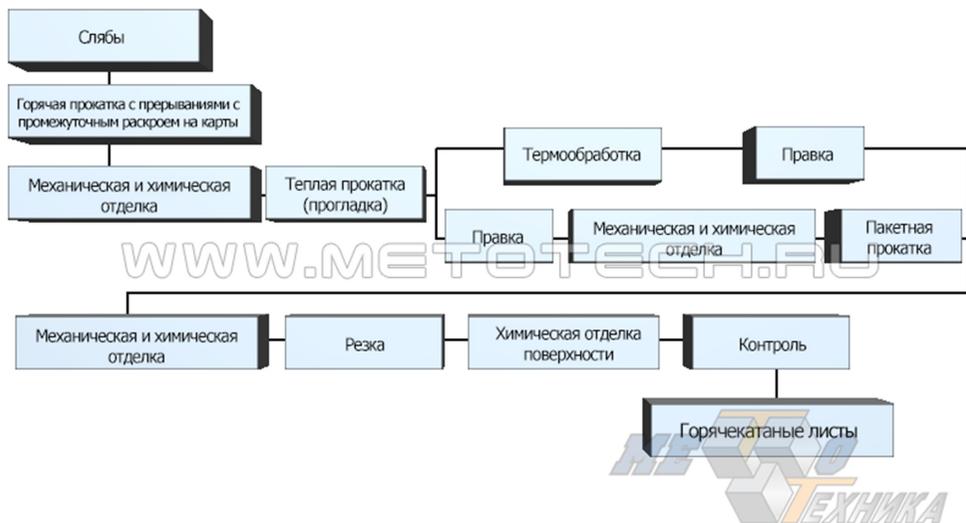


Рисунок 58. Цикл изготовления горячекатаных листов

В ходе прокатки горячим способом заготовка подвергается нагреву. Для достижения заданной толщины конечного продукта, в зависимости от толщины исходного материала, процесс прокатки может выполняться в один проход или повторяться несколько раз. После обработки в валках стана производятся дополнительные технологические операции по химико-механической отделке поверхности изделия с целью удалить с нее побочные соединения и достичь определенного класса чистоты. В заключение производится зачистка кромок, нарезка по длине, контроль качества и упаковка.

3.3.4.3. Прокатка титановых плит

Особенности производства титановых плит регламентированы нормативными требованиями ГОСТ 23755-79

и ОСТ 1 90024-71. Их выпускают преимущественно из технического Ti марок BT1-0 и BT1-00, а также из деформируемых сплавов с химсоставом, отображенным в ГОСТ 19807-74.

Прокатку титановых плит осуществляют горячим способом (рис. 59).



Рисунок 59. Стан горячей прокатки титановых плит

При этом используются следующие технологии:

- горячая прокатка без дополнительной термообработки (сплавы BT14, OT4, OT4-1, OT4-0, BT6, BT20, BT1-0, BT1-00, BT5-1);

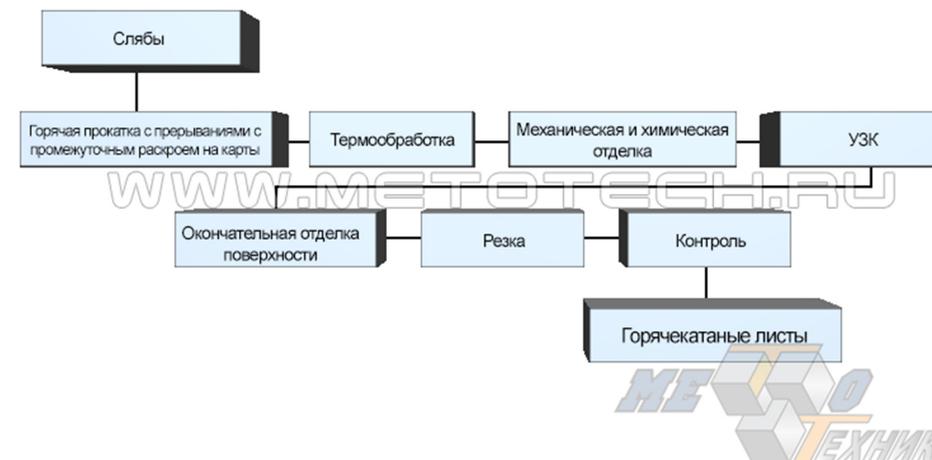


Рисунок 60. Схема техпроцесса изготовления горячекатаных титановых плит

При горячем прокате заготовка разогревается до необходимой температуры, после чего поступает в прокатный стан. Процесс прокатывания в валках стана может быть однократным или повторяющимся до обретения заготовкой требуемой толщины. Готовые изделия проходят этапы отжига, правки, химико-механической отделки и ультразвукового контроля качества. Затем плиты подвергаются окончательной поверхностной отделке, раскрою (резке) и финишному контролю качества.

Титановый прокат должен храниться в специально оборудованных складских помещениях, исключающих доступ

- горячая прокатка с предварительным отжигом (марка ПТЗВ).

Общая схема техпроцесса представлена на рис. 60.

агрессивных химических веществ и возможность механических повреждений.

3.3.5. Сфера практического применения

Титановые листы/плиты являются полуфабрикатами, особенно часто используемыми в промышленных целях. За счет сочетания малого показателя удельной плотности (обеспечивающего легкость выпускаемых изделий) с хорошими прочностными и механотехнологическими характеристиками, а также удобства форм-фактора и широкой номенклатуры размерных параметров, они повсеместно востребованы как актуаль-

ные конструкционные материалы, объединяющие в себе комплекс таких ценных эксплуатационных свойств, как небольшая масса, пластичность, термостойкость, устойчивость к коррозионным и гальваническим воздействиям. Последние два фактора объясняют особую ценность титановых листовых полуфабрикатов для медицинского применения, обуславливая их биоинертность по отношению к агрессивным воздействиям со стороны организма человека. В частности, они востребованы для эндопротезирования суставов и изготовления разнообразных ортопедических кон-

струкций в нейрохирургии, стоматологии и других отраслях практической медицины. Основными отраслями промышленного применения, где титановый листовой прокат используется в больших количествах, являются ракетостроение, судостроение, атомная энергетика, нефтегазодобывающая, химическая и пищевая промышленность. Год от года сфера использования титановых плит и листов неуклонно расширяется, что позволяет осуществлять производство элементов крупногабаритных конструкций, а также широкого ассортимента других деталей, удовлетворяющих требования потребителей.

3.4. ТИТАНОВАЯ ЛЕНТА И ФОЛЬГА

3.4.1. Общее определение, габариты, свойства

Ленту и фольгу относят к категории тонкого и сверхтонкого плоского титанового проката. Эти полуфабрикаты имеют значительно меньшую ширину, а в особенности толщину в сравнении с такими продуктами, как плита и лист (рис. 61). Ленту/фольгу производят из чистого технического Тi и его деформируемых сплавов.



Рисунок 61. Образцы титановой ленты и фольги

3.4.1.1. Размерные параметры

Фольга и лента – самые тонкие изделия в категории «Плоский титановый прокат». Они, как правило, имеют толщину, не превышающую одного миллиметра. В частности, толщина титановой ленты, применительно к функциональному назначению, обычно варьируется в диапазоне 0,1...0,85 мм; фольги – 2...80 мкм (от 0,02 до 0,08 мм). По ширине лента и фольга, как правило, идентичны (20-220 мм).

3.4.1.2. Свойства и характеристики

Лента и фольга, как и весь титановый прокат, обладают множеством полезных свойств.

Сочетая в себе высокие характеристики прочности (вшестеро прочнее, чем Al), коррозионной стойкости и жаростойкости, данные полуфабрикаты хорошо поддаются обработке давлением в видековки и штамповки. Вдобавок, они намного легче стальных аналогов, что также является существенным преимуществом.

Наряду с перечисленными, к полезным свойствам титановой ленты и фольги можно отнести:

- высокие показатели пластичности, сравнимые с Cu;
- низкую теплопроводность;
- значение предела текучести, сравнимое с аналогичным параметром легированных сталей, что

обуславливает возможность эффективного применения метода холодной прокатки;

- хорошую свариваемость;
- магнитную и биологическую нейтральность.

Наличие широкого спектра полезных качеств обеспечивает возможность применения данных титановых полуфабрикатов во множестве промышленных отраслей, где требования к качеству изделий достаточно высоки.

Единственный недостаток описываемой продукции – весьма высокая рыночная цена. Которая, впрочем, окупается сторицей благодаря повсеместной востребованности и оптимальному соотношению параметров «стоимость-качество».

Хранение фольги и ленты должно осуществляться под навесом, а еще лучше – в закрытых складских помещениях, изолированных от воздействия негативных атмосферных факторов. Нельзя также допускать повреждений механического генеза. Продукция производится и маркируется согласно требованиям соответствующих государственных и отраслевых нормативных актов.

3.4.2. Регламентирующие промышленные стандарты

Габариты, механосвойства и особенности поставок рассматриваемой продукции обусловлены требованиями следующих стандартов:

ОСТ 1 90027-71 «Лента из титановых сплавов»;

ОСТ 1 90145-74 «Фольга из титановых сплавов».

Химсостав применяемых марок Ti и его сплавов, а также перечень нормативов касательно отбора и подготовки проб отображены, соответственно, в ГОСТ 19807-91 «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки» и ГОСТ

24231-80 «Цветные металлы и сплавы. Общие требования к отбору и подготовке проб для химического анализа».

3.4.3. Марки и химсостав, требования к качеству

Номенклатура прокатного производства титановой ленты/фольги представлена в табл. 8.

Таблица 8. Титановая лента. Номенклатура прокатного производства:

Продукция	Марки	Габариты, мм		Стандарты
		Толщ.	Шир.	
Лента	BT1-0, BT1-00, OT4, OT4-0	0,1-0,85	20-220	ОСТ 1 90027-71 ГОСТ 19807-91
Фольга	BT1-0, BT1-00, OT4, OT4-0	0,02-0,08	20-200	ОСТ 1 90145-74 ГОСТ 19807-91 ГОСТ 24231-80

Для производства ленты и фольги применяют высокочистый титан марок BT1-0 и BT1-00, а также деформируемые титановые сплавы OT4 и OT4-0.

В таблице 9 приведен химический состав технического титана марок BT1 и BT1-0, а также деформируемых титановых сплавов OT4 и OT4-0 по ГОСТ 19807-

91 и ОСТ 1 9207-91, предназначенных для изготовления полуфабрикатов, включая ленту и фольгу.

Таблица... Химический состав (%) Ti и сплавов титановых деформируемых по ГОСТ 19807-91, применяемых для изготовления фольги и ленты

Таблица 9. Химический состав (%) Ti и сплавов титановых деформируемых по ГОСТ 19807-91, применяемых для изготовления фольги и ленты

Марка сплава	Ti	Al	V	Mo	Sn	Zr	Mn	Cr	Si	Fe	O	H	N	C	Прочие примеси
BT1-00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	0,15	0,1	0,008	0,04	0,05	0,1
BT1-0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,25	0,2	0,01	0,04	0,07	0,3
OT4-0	-	0,4-1,4	-	-	-	0,3	0,5-1,3	-	0,12	0,3	0,15	0,012	0,05	0,1	0,3
OT4-1	-	1,5-2,5	-	-	-	0,3	0,7-2,0	-	0,12	0,3	0,15	0,012	0,05	0,1	0,3

3.4.4. Производственные технологии

Титановые полуфабрикаты в виде ленты и фольги изготавливают методом холодной прокатки без предварительного разогрева заготовок, хотя полный

технологический цикл прокатки из толстых плит-слябов предусматривает их предварительную горячую прокатку для получения подката в виде полос, свариваемых в рулоны. (рис. 62).

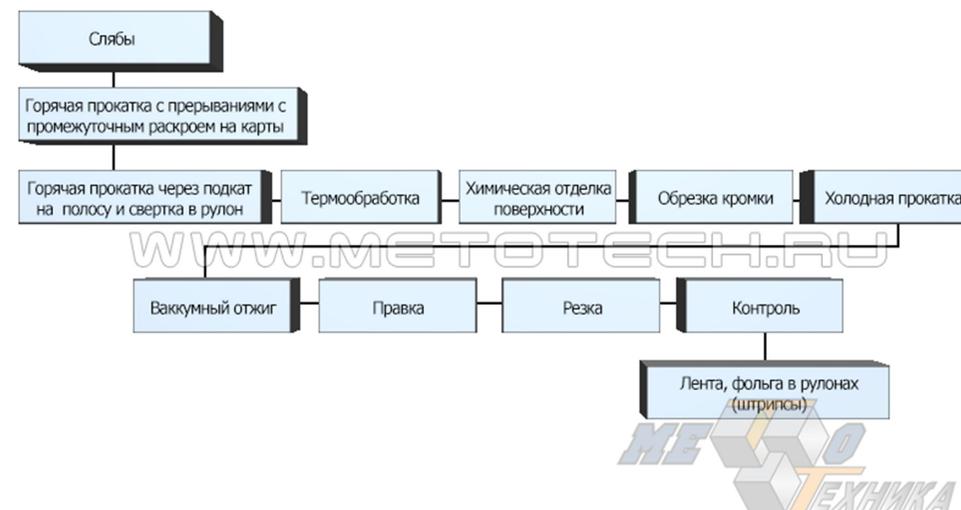


Рисунок 62. Полный технологический цикл производства титановой ленты и фольги

Таким образом, в качестве исходной заготовкой под холодную прокатку ленты используют горячекатаный рулонный листовой подкат. Однако поверхность исходной горячекатаной полосы покрывает окалина в виде оксидного слоя, который перед поступлением заготовки в рабочие валки прокатного стана в обязательном порядке следует разрушить и удалить. Прокатку без этих дополнительных операций осуществлять нецелесообразно, поскольку окалина, проникая в металл под высоким давлением, диффундирует с ним, ухудшая механические свойства готовой продукции. Кроме того, окалина, ввиду высокой твердости ее кристаллов, вызывает преждевременное изнашивание валков.

Известен ряд способов, как удалить окалину, однако чаще всего совместно применяются два из них: термический и химический. На этапе термообработки заготовка подвергается нагреву до высокой температуры, вследствие чего слой окислы покрывается сетью мелких трещин и легко поддается химическому воздействию. Сущность химического воздействия – кислотное травление заготовки до полного растворения поверхностной оксидной пленки.

Процедуру травления проводят в водном растворе HCl или H₂SO₄.

Применение соляной кислоты в качестве травильной жидкости более выгодно по сравнению с обработкой серной кислотой. Важнее всего то, что HCl реагирует с оксидами активнее, чем H₂SO₄. В результате процесс травления

протекает намного быстрее. При этом степень чистоты протравленной HCl металлической поверхности много выше, чем при использовании H₂SO₄. Еще один существенный плюс в пользу HCl состоит в том, что при ее применении сокращается выделение H₂, что сводит к минимуму риск возникновения такого негативного явления, как водородное охрупчивание. Наконец, соляную кислоту после травления легче удалить с поверхности металла, нежели серную.

Рулон очищенного от окислы подката проходит этап холодной прокатки на специализированном стане непрерывного действия (рис. 63).

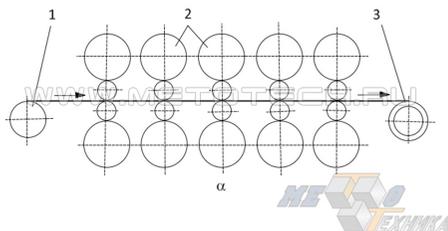


Рисунок 63. Схема стана холодной прокатки:

1-разматывающее устройство; 2-рабочие валки; 3-наматывающий барабан с тянущим усилием.

Сначала заготовка подается в разматывающее устройство стана. Край рулона автоматически отгибается специальным приспособлением и направляется в рабочие валки, обеспечивающие требуемую величину обжатия. Выходящая из валков готовая лента заданной толщины наматывается на барабан, вращающийся с некоторым усилием, и

вновь сворачивающим ее в плотный рулон.

Все первичные операции вплоть до заправки края рулона в валки и намотки на барабан 5-6 витков готовой ленты производятся на невысокой скорости (0,51-2,01 м/с). Затем стан начинает функционировать в рабочем режиме со скоростью прокатывания (26-32 м/с). Ближе к завершению процесса прокатки, когда в разматывающем устройстве остается 3-4 витка исходного рулона, скорость протяжки вновь замедляется до заправочного значения.

Следующая после прокатки технологическая стадия – процедура отжига в вакуумной среде, проводимая с целью устранить нежелательный деформационный наклеп и восстановить тем самым пластические свойства металла. С точки зрения структурных преобразований такой отжиг носит рекристаллизационный характер.

Отожженную ленту подвергают финишной правке, именуемой также дрессировкой. Дрессировка – это применяемая в косметических целях холодная прокатка с малой силой обжатия, обычно в диапазоне значений 0,81...1,51%.

В ходе данной процедуры обжимаемый валками тонкий поверхностный слой металла передает оказываемое на него усилие по всему объему дрессируемого участка, вследствие чего происходит выравнивание плоскости с выглаживанием волнистого рельефа.

Дрессировка является последней значимой операцией технологического цикла. После ее завершения готовая лента подвергается продольному раскрою на полосы требуемой ширины и процедурам контроля качества, а затем пакуется для придания товарного вида и отправки потребителю. Фольгу обычно прокатывают из готовой ленты пердедельным способом, позволяющим избежать непродуктивных финансовых затрат и потери времени на реализацию полного цикла.

3.4.5. Практическое применение

Лента и фольга характеризуются комплексом присущих всей титановой продукции ценных функциональных качеств: высокой степенью прочности, малой удельной массой, коррозионной стойкостью, пластичностью, ковкостью, хорошей свариваемостью, немагнитностью, биоинертностью и др. Поэтому их практическое применение имеет столь же широкую сферу, как и всех прочих полуфабрикатов из титана. Однако удобство форм-фактора в виде, прежде всего, малой толщины, позволяет использовать ленту и фольгу там, где применение прочего титанового проката ограничено либо вообще не представляется возможным.

Так, в частности, титановая лента – совершенно незаменимый исходный материал для последующей прокатки из нее фольги и выпуска тонкостенных сварных труб. Из ленты изготавливаются

сложные элементы в сфере электровакуумного приборостроения, судостроения, авионики, средств связи, насосных агрегатов, вентиляционных комунникаций, химических емкостей сложной конфигурации, оборудования военно-оружейного назначения.

Титановая фольга применяется в сферах, где востребован материал особо малой толщины. Так, ее использование широко практикуется при создании теплообменного оборудования, электроконденсаторов, вентиляционно-кондиционирующих устройств. Фольга из титана широко применяется в качестве защитного слоя, которым выстилают внутренние поверхности сосудов для хранения агрессивных жидкостей в химической, нефтехимической, медицинской и пищевой отраслях. Многослойную фольгу успешно применяют для изготовления

высокопрочных бронезилетов без сколь-нибудь значимого увеличения их массы. Не обходятся без нее и космические аппараты.

Актуальнейшая сфера применения ленты и фольги из титана – медицина. Диагностическое оборудование, хирургический инструментарий, трансплантология, ортопедия сегодня просто не могут обойтись без этих легких, прочных, неподверженных коррозии и магнитным воздействиям, а самое главное – не наносящих вреда человеческому организму материалов.

Научно-технический прогресс развивается стремительными темпами, обуславливая возникновения все новых областей использования титана. Лента и фольга не составляют исключения в данной закономерности.

3.5. ТИТАНОВАЯ ПРОВОЛОКА И НИТЬ

3.5.1. Общее определение, габариты, свойства

Титановая проволока – полуфабрикат в виде бесконечного тонкого прутка круглого сечения, изготавливаемый путем протяжки (волочения) сквозь фильеры волочильного стана. Титановой нитью называют особо тонкую проволоку. Проволоку поставляют в бухтах, нить – намотанной на катушки (рис. 64).



Рисунок 64. Титановая проволока

3.5.1.1. Габариты

Максимальная длина проволоки в бухте и нити на катушке не регламентирована. Минимальная длина – не менее 10 м. Возможна поставка в виде отрезков. Наиболее востребованные диаметры проволоки – 1,1...7,1 мм, нити – менее одного миллиметра.

3.5.1.2. Основные эксплуатационные свойства

Проволоку и нить следует отнести к одним из самых востребованных позиций в категории титановых полуфабрикатов. В отличие от аналогичных изделий из иных металлов, им присуще гармоничное сочетание множества полезных потребительских свойств.

Важнейшими преимуществами данных изделий являются:

- высокие показатели прочности и пластичности;
- устойчивость к воздействию коррозии, в т.ч. под влиянием соленой воды и агрессивных химреагентов (исключение – щелочная среда);
- возможность эксплуатации в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных (от -255 до +555 °C);;
- малая удельная масса;
- фактор низкой теплопроводности;
- магнитная и бионейтральность.

Уникальной отличительной особенностью проволоки из сплава титана с никелем (никелид титана) является эффект «запоминания формы».

Наряду с многочисленными достоинствами можно выделить лишь два недостатка.

1. Титан подвергается разрушению в насыщенных щелочных средах. Обеспечить эффективную защиту удастся, применяя способы специальной химической обработки.

2. Высокая себестоимость. Тем не менее, поскольку проволока из титана является очень долговечным, практичным, а часто и совершенно незаменимым материалом, ценовой фактор во многом утрачивает свою деструктивную значимость.

3.5.2. Регламентирующие промышленные стандарты

Размерные параметры, механосвойства, условия поставок титановой проволоки регламентированы нормативами:

ГОСТ 27265-87 «Проволока сварочная из титана и титановых сплавов»;

ОСТ 1 90015-72 «Проволока сварочная из титановых сплавов».

ГОСТ 27265-87 на сварочную проволоку из титановых сплавов был введен в 1989 г. В 1991 г. срок его применения был продлен. В 2005 г. в данный стандарт внесены два изменения. В 2006 г. срок его действия (с изменениями) был признан неограниченным. В 2010 г. текст актуализирован.

3.5.3. Марки и химсостав, требования к качеству

Химсостав марок Ti и его сплавов регулируется ГОСТом 19807-91, введенным взамен ГОСТа 19807-74.

Титановую проволоку/нить, согласно ГОСТ 27265-87, производят из титана марок BT1-0/BT1-00 (содержание чистого Ti – 99,61...99,98 %), а также деформируемых сплавов:

BT3, BT5, BT5-1, BT6, BT6C, BT9, BT14, BT15, BT16, BT20, BT22, BT23, OT4, OT4-1, TC6, ПТЗВ

Поименованные сплавы содержат легирующие добавки Al в различных соотношениях. Сплавы OT4, OT4-1 помимо Al содержат Mn и Zr, а сплав BT6 – V. Марками с наиболее высокой концентрацией легирующих компонентов являются BT20-1, BT20-2. В их составе, наряду с Al, присутствуют определенные доли Mo, V и Zr.

Высококачественная титановая проволока имеет характерный серебристо-серый окрас без вкраплений иных цветов. Качество продукции должно соответствовать всем требованиям установленных стандартов. Допустима слегка волнообразная структура поверхности – это обусловлено особенностями технологии волочения. Хранение следует осуществлять в специально оснащенных складских помещениях, обеспечивающих эффективную защиту от негативных воздействий окружающей среды и повреждений механического характера.

3.5.4. Производственные технологии

Титановая проволока изготавливается методом волочения (протяжки) на специальном оборудовании. Перед протяжкой в обязательном порядке осуществляется предварительная подготовка исходного полуфабриката с применением таких операций, как химическое травление и дегазация.

Травление необходимо для того, чтобы путем химической реакции удалить с поверхностного слоя загрязнения, оксидно-жировую пленку, другие побочные образования. Дегазация же – не что иное, как удаление из химсостава материала водорода и других газов, вызывающих т. наз. охрупчивание титана. Материал после травления и дегазации обретает высокие показатели коррозионной стойкости, пластичности и прочности на разрыв.

3.5.4.1. Сущность технологии протяжки

Волочение – сложный и ответственный процесс. Для получения готовой продукции высокого качества осуществлять его требуется поэтапно, в строго определенной последовательности, с использованием специального оборудования (рис. 65).



Рисунок 65. Линия волочения проволоки

Сущность процесса волочения состоит в протягивании исходной заготовки сквозь сужающееся отверстие в центре т. наз. фильеры – выполняемой из инструментальной стали или высокопрочных порошковых сплавов цилиндрической матрицы, устанавливаемой в обойму специального инструмента – волоки. Выполненная из пластичной стали обойма фильеры (волочильная доска), не оказывая на фильеру деформирующего воздействия, одновременно компенсирует возникающее растягивающее напряжение.

Сама же волока является основным конструкционным компонентом волочильного стана, на котором осуществляется полный цикл протяжки проволоки. Диаметр готовой проволоки определяются параметрами фильерного отверстия, но всегда должен быть меньшим, чем входной диаметр заготовки (рис. 66).

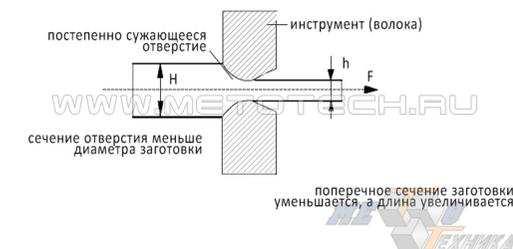


Рисунок 66. Принцип волочения: протяжка заготовки сквозь фильеру волоки

Соотношение диаметров заготовки на входе и проволоки на выходе при различных способах протяжки указаны в табл. 10.

Таблица 10. Соотношение диаметров заготовки на входе и проволоки на выходе при различных способах протяжки

Диаметры проволоки, на входе и на выходе		
Вид волочения	Первоначальный диаметр, мм.	Финальный диаметр, мм.
Грубое волочение	8.0	5.0 - 0.9
Среднее волочение	3.5	1.5 - 0.2
Тонкое волочение	2.6 - 1.6	0.5 - 0.05
Сверхтонкое волочение	0.5	0.14 - 0.025
Ультратонкое волочение	0.35	0.1 - 0.01

На современных крупных предприятиях волочение титановой проволоки осуществляют с применением многофильберных волок, позволяющих в разы повысить производительность оборудования и минимизировать энергозатраты, а значит – существенно снизить себестоимость готовой продукции (рис. 67).



Рисунок 67. Фильеры волочильного стана в обоямах волоки.

Метод волочения, в сравнении с прокаткой, характеризуется такими существенными преимуществами, как высокая чистота поверхностной структуры и прецизионная точность размерных параметров, вследствие чего получаемые изделия, как правило, не нуждаются в дополнительной обработке. Номенклатура таких изделий включает в себя, помимо проволоки тех или иных разновидностей (электротехнической, сварной, вязочной и т.д.), продукцию в виде фасонных профилей, труб и прутков различного диаметра. Что касается непосредственно проволоки и нити из Ti и его сплавов, то технология волочения обеспечивает возможность изготовления продукции в широком диапазоне диаметров – от нескольких микрон до десяти и более миллиметров.

На сегодняшний день метод протяжки на волочильных станах отработан во всех отношениях. В последние десятилетия разработаны конструкции станков различных типов, функционирующих без сбоев и позволяющих осуществлять полный технологический цикл при значительной величине обжатия заготовок и с высокой скоростью, достигающей 65 м/сек, а нередко даже превышающей это значение.

3.5.4.2. Этапы процесса

Производственный процесс выпуска титановой проволоки методом волочения осуществляется поэтапно. Последовательность этапов отображена на рис. 68.



Рисунок 68. Технологическая схема процесса волочения

Исходную заготовку подвергают травлению в растворе H_2SO_4 , нагретом до 55 °С. Затем поверхность металла высушивают и удаляют с нее налет окалины, что позволяет увеличить срок службы дорогостоящего оборудования. Далее осуществляется непосредственно процедура волочения: заготовку протягивают сквозь фильеру. Это основной этап процесса, в ходе которого формируется проволока требуемого диаметра. После

протяжки проволоку окончательно очищают и упаковывают в рулоны или наматывают на катушки для приведения в товарное состояние. При необходимости, с целью оптимизации кристаллической структуры (доведение до мелкозернистой консистенции), после волочения и очистки готовую проволоку дополнительно подвергают отжигу.

3.5.4.3. Оборудование для волочения

Современные промышленные предприятия оснащаются специализированными волочильными станами двух основных разновидностей, различающихся между собой типами конструкции тянущего механизма.

1. Станы барабанного типа – тянущая сила обеспечивается приемным механизмом: двигатель стана приводит в движение вращающийся барабан, наматывающий на себя готовую проволоку (рис. 51).



Рисунок 69. Волочильный стан барабанного типа

2. Станы прямоточного типа – тянущая сила обеспечивается подающим механизмом, проталкивающим заготовку

сквозь отверстие фильеры: в этом случае готовая продукция не требует намотки на барабан и движется в прямолинейном направлении (рис. 70).



Рисунок 70. Прямоточный волочильный стан

Волочильные станы обоих типов востребованы в одинаковой степени и применяются по мере необходимости.

3.5.5. Изготовление проволоки и нити из никелида титана

В настоящее время все более актуальным становится применение сплава, именуемого никелидом титана, или нитинолом. Данный **интерметаллид TiNi** получают, сочетая в равных соотношениях Ti и Ni (рис. 71).

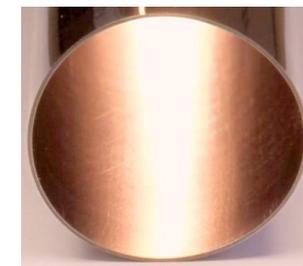


Рисунок 71. Сплав нитинол

Главнейшее преимущество нитинола – это т. наз. с эффект запоминания формы (ЭЗФ), возникающий на фоне свойства сверхупругости, присущего данному сплаву.

В чем заключается сущность ЭЗФ? Оказывается, при охлаждении в заданном температурном режиме изделие из сплава нитинол легко подвергается деформированию, но если поднять температуру до прежнего уровня, сразу же происходит самоустранение возникшей деформации за счет сверхупругости сплава – изделие обретает изначальную форму. Проще говоря, если, скажем, чайную ложечку из нитинола изогнуть при низкой температуре, то в этом же температурном режиме ее новая конфигурация будет все время оставаться неизменной. Однако при повышении T° до исходного значения изделие, словно пружина, опять выпрямится и обретет первоначальный вид (рис. 72).



Рисунок 72. Демонстрация эффекта запоминания формы

Спектр практического применения никелид-титанового сплава весьма обширен и охватывает множество промыш-

ленных отраслей. В частности, выполненный из нитинола упругий металлический каркас шин позволяет многократно повысить грузоподъемность и проходимость карьерных самосвалов, другой спецтехники, предназначенной для эксплуатации в экстремальных условиях (рис. 73).



Рисунок 73. Изготовление из никелида титана каркаса шин с «памятью формы» для большегрузных автомобилей

Незаменим нитинол и в области медицины. В такой ее сфере, как сосудистая хирургия, его широко применяют для изготовления т. наз. стентов, а также других ортопедических изделий



Рисунок 74. Пищеводный стент из нитинола

Никелид-титановые сплавы, обладающие, наряду с ЭЗФ, способностью эффективно противостоять коррозии и гальваническим воздействиям, биоинертностью, невосприимчивостью к магнетизму – идеальный материал для изготовления таких уникальных изделий, как биомеханически совместимые имплантаты (БМСИ), а также эндопротезы хрящесвязочных суставных тканей человеческого организма.

Тонкая и тончайшая никелид-титановая проволока – продукция, крайне сложная в изготовлении, что обуславливает ее высокую себестоимость, ступенчато возрастающую по мере снижения величины диаметра.

В рамках поэтапно выполняемого технологического процесса на первоначальном цикле цилиндрические слитки-биллеты ($\varnothing \leq 26$ мм) проходят в несколько проходов горячую прокатку до получения штучных проволочных заготовок пяти – восьми миллиметрового диаметра. Затем заготовки поочередно деформируются, многократно подвергаясь горячей протяжке на волочильной машине и после каждого цикла волочения проходя промежуточный отжиг, а также другие вспомогательные операции.

Ввиду высокой длительности и сложности производственного процесса \varnothing проволочной продукции из нитинола, выпускаемой промышленными партиями, составляет не менее 63 мкм. Проволока более тонких размеров (супер-

тонкая) массовыми партиями не выпускается, а изготавливается по индивидуальным заказам.

3.5.5.1. Инфракрасный нагрев проволоки из нитинола перед волочением и его преимущества

Важнейшим этапом технологии изготовления тонкой проволоки из никелида титана является волочение, осуществляемое горячим способом с обязательным предварительным нагревом заготовок до определенной температуры с целью повышения их пластических характеристик. Особенно ответственной является процедура нагрева при получении проволоки сверхмалых диаметров – нагрев исходного материала должен осуществляться дозированной и под строжайшим контролем специалиста-оператора.

Традиционными методами выполнения данной операции считаются нагрев струей пламени и нагрев электроконтактным способом. Однако по отношению к сверхтонким заготовкам эти способы неприменимы ввиду высокого риска пережигания материала и его обрывов.

Самым оптимальным решением на этот случай, позволяющим избежать опасности пережога, является специально разработанная технология, предусматривающая дозированный инфракрасный нагрев заготовки перед ее поступлением в фильеру. Технологическая схема реализации данного способа представлена на рис. 75.

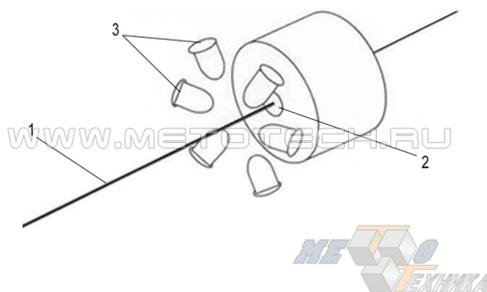


Рисунок 75. Инфракрасный нагрев проволоки из никелида титана, предшествующий волочению

Перед протяжкой исходную заготовку (1) на входе в отверстие фильеры (2) подвергают дозированному воздействию потока инфракрасного излучения, генерируемого радиально расположенными вокруг оси проволоки полупроводниковыми диодами.

Дозируемый контролируемый нагрев осуществляется равномерно, без превышения заданного температурного порога – прямо-таки с ювелирной точностью. Что, в свою очередь, позволяет обеспечить высокое качество получаемой на выходе конечной продукции даже в нанометровом диапазоне диаметров. Применение вышеописанного способа, помимо указанных преимуществ, во многом способствует возможности наладить серийный выпуск продукции благодаря значительному снижению ее общей себестоимости.

3.5.6. Сфера практического применения

Проволока из Ti и его сплавов, как и все прочие полуфабрикаты, активно используется во множестве промышленных отраслей благодаря комплексу уникальных свойств данного металла. При этом изделия из проволоки, ввиду особенностей ее форм-фактора, совершенно незаменимы там, где применение иной титановой продукции не представляется возможным.

Без электродов из титановой проволоки трудно представить современные электросварочные процессы во всем их многообразии. Методом электродуговой сварки в среде аргона и других инертных газов с применением титановых электродов удается получать термостойкие швы высочайшей прочности, не поддающиеся коррозии в пресной и морской воде, а также воздействию агрессивных химических сред (за исключением щелочных). Помимо этого, характеристики металла обеспечивают возможность соединения свариваемых деталей, имеющих толщину 15...25 мм, всего в один проход. Проволоку из титановых сплавов используют и как присадочный материал при сваривании изделий из Ti. На тот факт, что проволока предназначена, прежде всего, для сварки, указывает аббревиатура из маленьких букв «св», употребляемая вслед за основным названием марки (например, BT-00св., OT4-1св., BT6 св. и т.д.).

Весьма распространено применение титановой проволоки в составе радиоэлектронного оборудования, двигателей и приводных механизмов, функционирующих в экстремальных условиях (авиастроение, судостроение, космические аппараты и т.д.).

Фильтрующие элементы и сита из титановой проволоки – обязательные атрибуты в химическом и пищевом машиностроении.

Обладая характерным серебристым блеском с различными отливками, которые придают легирующие добавки, титан и его сплавы используются в ювелирном деле для изготовления украшений и декоративных предметов обихода.

Особая сфера применения титановой проволоки – медицина. Биологическая

инертность титана по отношению к тканям организма человека, его легкость, прочность, пластичность, невосприимчивость к химико-гальваническим и магнитным воздействиям – эти и все прочие полезные качества обуславливают применение проволоки из титана для изготовления имплантатов, протезов, сосудистых стентов, шовных материалов и других не имеющих себе аналогов изделий в сферах кардио- и нейрохирургии, стоматологии, офтальмологии и т.д.

По мере развития научно-технического прогресса сфера практического использования титановых полуфабрикатов, включая проволоку и нить, будет более расширяться до пределов, которые сегодня просто невозможно вообразить.

3.6. ТИТАНОВЫЕ ТРУБЫ

3.6.1. Общее определение, габариты, свойства

Трубы из Ti и его сплавов имеют вид полых профилей различных сечений и диаметров (рис. 76).



Рисунок 76. Трубы титановые

Наличие тех или иных уникальных свойств титановых полуфабрикатов данной разновидности обусловлено их химическим составом, методом изготовления и состоянием материала. Изделия относятся к категории дорогостоящих, а потому предназначены, главным образом, для применения в условиях экстремальных температур, агрессивных сред и высоких механических нагрузок.

3.6.1.1. Габариты

Важнейшими габаритными параметрами трубной продукции из титана являются длина и внутренний \varnothing , а также тол-

щина стенок. Трубопродукцию из Ti, характеризующую невысокими значениями ϕ и толщины стенок, называют трубкой. К определяющим критериям причисляется также вес.

Трубы, классифицируемые, прежде всего, по критерию длины, могут быть:

- мерными;
- кратными мерной длине;
- немерными.

Изделия чётко подразделяют по соотношению размерных параметров. Так, например, горячекатаные бесшовные трубы внутренним ϕ 83,01...480,01 мм имеют стенки толщиной 6,01...65,01 мм (ГОСТ 21945-76). Аналогичные показатели для холоднодеформированных труб, согласно ГОСТ 22897-86, составляют 5,81...130,01 мм и 0,51...8,51 мм соответственно.

Вес титановых труб зависит от длины, диаметра и толщины стенок. К примеру, вес изделия метровой длины при диаметре 25,1 и толщине стенки 2,01 мм будет составлять 660 г. А при такой же длине, диаметре 141 мм и толщине стенки 6,01 мм вес составит 11,37 кг.

3.6.1.2. Основные потребительские свойства

Трубная продукция относится к ряду титановых полуфабрикатов, имеющих наибольшую востребованность в различных промышленных отраслях. Это обусловлено сочетанием множества полезных качеств, важнейшие из которых –

невысокая плотность, малый удельный вес, пластичность, устойчивость к коррозии и воздействию агрессивных химреагентов и углеводов, биологическая инертность, низкий показатель теплопроводности, высокие характеристики свариваемости и некоторые другие уникальные качества, сохраняющиеся в широком диапазоне температур.

По способу производства титановые трубы могут быть как бесшовными, изготавливаемые методами холодной и горячей обработки давлением, так и шовными, производимыми с помощью сварки из плоского листового проката.

Самыми надёжными являются цельнотянутые трубы, для производства которых используют монолитные литые цилиндрические заготовки-билеты, имеющие круглое поперечное сечение. Такие трубы характеризуются наиболее высокими показателями прочности. Перед протяжкой на всем протяжении билета строго по центру высверливается продольное отверстие требуемого диаметра, формирующее внутреннюю полость будущей цельнотянутой трубы.

Основной недостаток труб из Ti и сплавов на его основе – высокая себестоимость, которую формируют дороговизна материала и сложность технологий изготовления.

К числу недостатков данной продукции можно также отнести проблемный характер монтажа коммуникаций. Для прокладки трубопровода из титановых труб исключительное значение имеет

верный расчёт основных габаритных параметров и функциональных значений применительно к конкретным условиям эксплуатации.

3.6.2. Регламентирующие промышленные стандарты

Размерные параметры, механосвойства, технические требования, условия поставок регламентированы нормативами:

ТУ 1-5-132-78, ТУ 14-1У-1909-93, ТУ 14-3-821-79

«Заготовки трубные из титановых сплавов»;

ОСТ 1 90050-72

«Трубы из титановых сплавов»;

ОСТ 1 90065-72

«Трубы из титановых сплавов повышенного качества»;

ГОСТ 24890-81, ОСТ 1 90051-79

«Трубы сварные из титана и титановых сплавов»;

ТУ 1-5-107-78

«Трубы прессованные из титановых сплавов»;

ГОСТ 22897-86

«Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплавов на основе титана»;

ТУ14-3-1280-84

«Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплава марки ПТ-3В»;

ТУ 14-3-820-79, ТУ 14-3-521-76

«Титановые трубы бесшовные холоднодеформированные»;

ГОСТ 21945-76, ТУ 14-3-821-79 1М

«Трубы бесшовные горячекатаные из сплавов на основе титана»;

ТУ 14-3-161-73

«Трубы бесшовные малых размеров из сплавов 1М и ВТ1-00».

3.6.3. Марки, химсостав, требования к качеству

Изготовление труб осуществляется из чистого Ti без содержания легирующих примесей (марки ВТ1-0, ВТ1-00), а также ряда деформируемых титановых сплавов таких марок, как:

- ОТ4-0, ОТ4-1;
- ПТ-7М, ПТ-3В;
- ВТ 14.

Химсостав перечисленных марок регламентирован ГОСТ 19807-91 («Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки»), а также ОСТ1 90013-81 («Сплавы титановые. Марки»).

По качеству изготовления изделия подразделяют на две группы:

Группа А – титановые трубы отожженные с протравленной поверхностью;

Группа Б – титановые трубы без термообработки и протравливания поверхности.

При этом с внешней и внутренней стороны конечный продукт каждой группы не должен иметь таких дефектов,

как расслоения, трещины, следы крупноабразивной зачистки, глубокие забоины, вогнутости и плохо проваренные швы. Торцы изделия с каждой стороны обрезают под 90° и удаляют шероховатости путем шлифовки.

3.6.4. Производственные технологии

Титановые трубы, согласно методам производства, подразделяют на бесшовные и шовные. В зависимости от предназначения и функциональных характеристик их применяют в тех или иных промышленных отраслях.

Бесшовные трубы – цельные изделия, не содержащие швов и прочих соединений. По способу изготовления они могут быть холоднодеформированными (холоднокатаными и холоднотянутыми) или горячекатаными. Холоднодеформированные титановые трубы являются, как правило, тонкостенными и используются в условиях, не требующих больших нагрузок. Горячекатаные трубы имеют меньшую величину внутреннего диаметра при значительно большей толщине стенок в сравнении с холоднодеформированными аналогами. Они применяются, главным образом, для транспортировки жидкостей и газов под большим давлением.

Шовные трубы изготавливают сварным способом, поэтому их чаще называют сварными. Исходным материалом для изготовления такой продукции служит плоский титановый прокат в виде листа или ленты. Толстые листы сворачивают продольно, а тонкую ленту – в виде

спирали. На линию соединения накладывается сварной шов.

Холоднодеформированные трубы подвергают дополнительной термообработке (отжиг) и чистовой отделке поверхности химическим травлением или механическим шлифованием.

По качественному критерию горячекатаную трубную продукцию из Ti и его сплавов выпускают в высшей или первой категории. В первом случае изделия проходят термообработку (вакуумный отжиг) и механическую шлифовку поверхности. По отношению к трубам 1-й категории применяется отжиг в безвакуумной среде. Эти изделия не подвергаются травлению и чистовой отделке поверхности.

Размерные параметры, условия поставок, механические свойства бесшовных труб холодной деформации оговорены в тексте стандартов ГОСТ 22897-86, ОСТ1 90050-72, ОСТ1 90065-72, а горячекатаных труб – ГОСТ 21945-76.

Сварные трубы изготавливают по регламенту ГОСТ 24890-81 из чистого Ti VT1-0 или сплава OT4-0. Химсостав определяется по ГОСТ 19807-74.

3.6.4.1. Производство бесшовных труб холодной деформации

Холоднодеформированные бесшовные трубы производятся методами холодной прокатки или волочения (рис 77.).



Рисунок 77. Холодная прокатка и волочение титановых труб

Общетеchnологический процесс холодной прокатки, будучи весьма сложным и многоэтапным, включает в себя ряд последовательно осуществляемых операций (рис. 78).

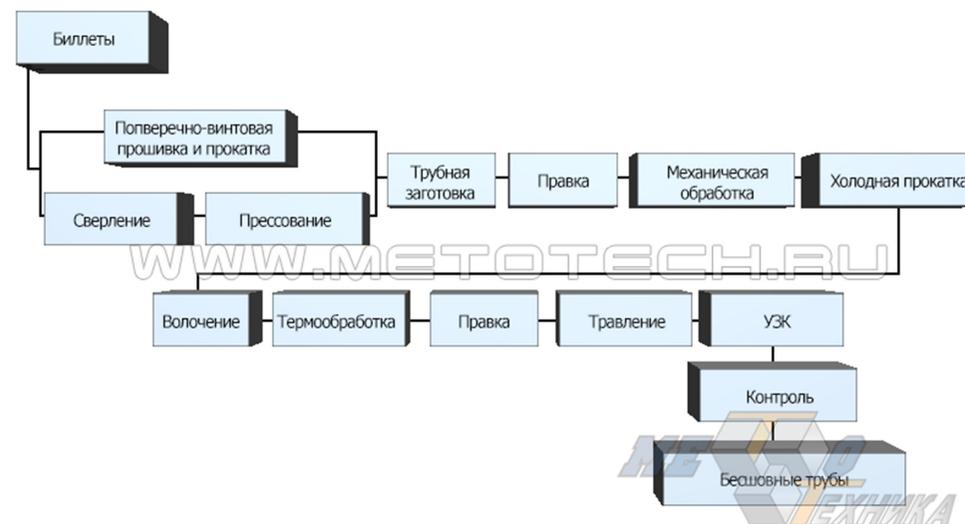


Рисунок 78. Последовательность холодной прокатки бесшовных титановых труб

В ходе подготовительного этапа производится поперечно-винтовая прокатка и прошивка исходных цилиндрических заготовок-биллетов с применением выверливания и прессования, после чего получаемая трубная заготовка в виде поллой гильзы подвергается правке и механической обработке кромок для устранения заусенцев и неровностей. В ходе основного этапа выполняется холодная прокатка гильзы в трубу и, при необходимости, последующее волочение поступающей на волочильный стан холоднокатаной трубы с целью изменения ее диаметра. Готовые трубы подвергаются термообработке, правке и травлению, а на выходе – ультразвуковому контролю (УЗК), гидроиспытаниям, перископическому контролю (прямолинейной полосты) и прочим методам проверки качества.

Здесь же следует отметить, что весьма распространенным является т. наз. передельный (от переделать) способ изготовления труб холодной деформации, когда холодной прокатке подвергаются горячекатаные трубы. В этом случае процесс на подготовительном этапе значительно упрощается, а общая себестоимость конечной продукции минимизируется, поскольку функцию поступающих в валки гильз выполняют уже готовые горячекатаные трубы.

3.6.4.2. Производство горячекатаных титановых труб

Технология изготовления титановых труб методом горячей прокатки также реализуется поэтапно.

Подготовительный этап имеет много общего с аналогичной процедурой подготовки трубных заготовок для холодной прокатки, с той лишь существенной разницей, что перед первоначальной поперечно-винтовой прокаткой (прошивкой) исходные биллеты нагревают до высокой температуры, поддерживаемой также во время прокатки полученных трубных заготовок-гильз. Нагрев производится в высокочастотных индукционных печах с последующим выравниванием температуры в электропечах сопротивления.

Температура нагрева зависит от марки Ti/сплава и составляет, для марок, соответственно:

- ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0 – 850-960 °С;
- ОТ4, ОТ4-0 – 900-1000 °С;
- ВТ5, ВТ5-1, ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ14 – 1000-1100 °С.

Прокатка может выполняться в несколько прогонов до получения труб с толщиной стенок требуемых значений.

Для изготовления горячекатаных труб может быть использован стан одной из следующих разновидностей:

- двухвалковый;
- трехвалковый;
- раскатный с дисковидными валками;
- автоматический многовалковый;
- стан непрерывной прокатки.

Основной объем горячекатаных труб изготавливается с помощью многофункциональных трубопрокатных станов непрерывного действия (рис. 79).



Рисунок 79. Непрерывная горячая прокатки титановых труб

Высокую производительность в промышленных масштабах позволяет обеспечить также применение компьютеризованных автоматических трубопрокатных станков, работающих по заданным программам и осуществляющих выпуск продукции промышленными партиями без ущерба для качества.

3.6.4.3. Производство сварных титановых труб

В качестве исходных заготовок для сварных труб используют ленту (штрипс) или листовые слябы, предварительно прошедшие деформационный цикл горячей прокатки в листы/полосы с целью уменьшения толщины. Образование трубного профиля происходит либо за счет продольного изгиба листовой заготовки (прямошовные трубы) или путем спирального сворачивания штрипса. Соединение примыкающих друг к другу кромок выполняется сварным способом, для чего может применяться контактная или аргонно-дуговая электросварка. По завершении сварочных операций готовые трубы подвергают дополнительному отжигу.

Трубы, имеющие $\varnothing 60,01...530,01$ мм изготавливают с применением контактной электросварки, а более крупных диаметров – посредством аргонно-дуговой сварки с плавящимся электродом.

Общетеchnологическая схема изготовления сварных труб представлена на рис. 80

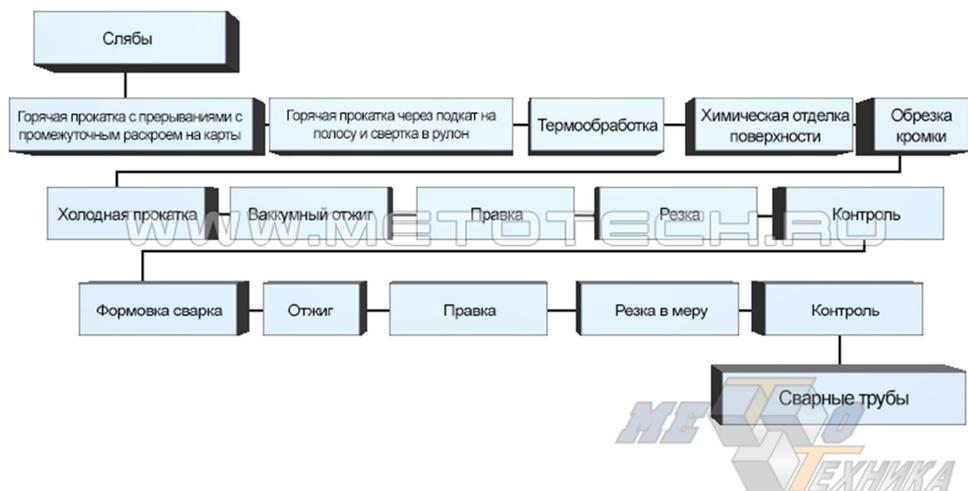


Рисунок 80. Схема техпроцесса производства титановых труб сварным методом

Готовая продукция проходит полный цикл контроля качества, включая контроль ультразвукового и токовихревого характера, а также контроль путем пневмо-гидроиспытаний.

3.6.5. Практическое применение

Трубы входят в разряд широко востребованных полуфабрикатов со множеством вариантов практического использования. Основным из таких вариантов применительно именно к трубам

является прокладка трубопроводных коммуникаций. По титановым трубопроводам осуществляется, главным образом, транспортировка разного рода агрессивных жидкостей и газов. Трубные изделия из Ti и его сплавов незаменимы в химической, нефтехимической, судостроительной, медицинской и многих других отраслях, где высокая стоимость данной продукции не является препятствием для ее закупки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены различные аспекты, связанные с металлом титан - свойства, области применения, производство, продукция.

Как описано в статье, процесс получения рассматриваемого металла состоит из многих стадий и является достаточно трудоемким, особенно учитывая высокую химическую активность Ti. Авторы постарались выделить наиболее значимые этапы производства титана и обратить внимание на важные особенности.

Обзор свойств и областей применения титана показывает, что это очень важный материал, без которого в некоторых отраслях промышленности просто

невозможно обойтись. Он обладает уникальными свойствами, которые в некоторых ситуациях нельзя получить путем применения других материалов.

Обзор выпускаемой промышленностью продукции из титана - проволоки, прутков, труб, листов, плит, порошка - позволяет лучше понять ее особенности, важные свойства и конкретные применения.

Авторы надеются, что приведенный в статье материал будет интересен и полезен читателям. Свои замечания и предложения можно присылать на адрес info@metotech.ru.