# Содержание

Содержание - 1 -

Титан и его модификации. - 2 -

Структуры титановых сплавов. - 2 -

Особенности титановых сплавов. - 3 -

Влияние примесей на титановые сплавы. - 4 -

Основные диаграммы состояния. - 5 -

Пути повышения жаропрочности и ресурса. - 7 -

Повышение чистоты сплавов. - 8 -

Получение оптимальной микроструктуры. - 8 -

Повышение прочностных свойств термической обработкой. - 8 -

Выбор рационального легирования. - 10 -

Стабилизирующий отжиг. - 10 -

Используемая литература. - 12 -

# Титан и его модификации.

Титан является переходным металлом и имеет недостроенную d-оболочку. Он находится в четвертой группе Периодической таблицы Менделеева, имеет атомный номер 22, атомную массу 47,90 (изотопы: 46 - 7,95%; 48 - 73,45%; 49 - 5,50% и 50 - 5,35%). Титан имеет две аллотропические модификации: низкотемпературную α-модификацию, имеющую гексагональную атомную ячейку с периодами а=2,9503±0,0003 Ǻ и с=4,6830±0,0005 Ǻ и соотношением с/а=1,5873±0,0007 Ǻ и высокотемпературную β - модификацию с объемно центрированной кубической ячейкой и периодом а=3,283±0,003 Ǻ. Температура плавления титана, полученного методом иодидного рафинирования, равна 1665±5°С.

# Структуры титановых сплавов.

Титан подобно железу является полиморфным металлом и имеет фазовое превращение при температуре 882°С. Ниже этой температуры устойчива гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка α-титана, а выше – объемно центрированная кубическая (о. ц. к.) решетка β-титана.

Титан упрочняется легированием α- и β-стабилизирующими элементами, а также термической обработкой двухфазных (α+β)-сплавов. К элементам, стабилизирующим α-фазу титана, относятся алюминий, в меньшей степени олово и цирконий. α-стабилизаторы упрочняют титан, образуя твердый раствор с α-модификацией титана.

За последние годы было установлено, что, кроме алюминия, существуют и другие металлы, стабилизирующие α-модификацию титана, которые могут представлять интерес в качестве легирующих добавок к промышленным титановым сплавам. К таким металлам относятся галлий, индий, сурьма, висмут. Особый интерес представляет галлий для жаропрочных титановых сплавов благодаря высокой растворимости в α - титане. Как известно повышение жаропрочности сплавов системы Ti – Al ограничено пределом 7 – 8% вследствие образования хрупкой фазы. Добавкой галлия можно дополнительно повысить жаропрочность предельнолегированных алюминием сплавов без образования α2-фазы.

Алюминий практически применяется почти во всех промышленных сплавах, так как является наиболее эффективным упрочнителем, улучшая прочностные и жаропрочные свойства титана. В последнее время наряду с алюминием в качестве легирующих элементов применяют цирконий и олово.

Цирконий положительно влияет на свойства сплавов при повышенных температурах, образует с титаном непрерывный ряд твердых растворов на основе α – титана и не участвует в упорядочении твердого раствора.

Олово, особенно в сочетании с алюминием и цирконием, повышает жаропрочные свойства сплавов, но в отличие от циркония образует в сплаве упорядоченную фазу .



Преимущество титановых сплавов с α-структурой – в высокой термической стабильности, хорошей свариваемости и высоком сопротивлении окислению. Однако сплавы типа α чувствительны к водородной хрупкости ( вследствие малой растворимости водорода в α-титане) и не поддаются упрочнению термической обработкой. Высокая прочность, полученная за счет легирования, сопровождается низкой технологической пластичностью этих сплавов, что вызывает ряд трудностей в промышленном производстве.

Для повышения прочности, жаропрочности и технологической пластичности титановых сплавов типа α в качестве легирующих элементов наряду с α-стабилизаторами применяются элементы, стабилизирующие β-фазу.

Элементы из группы β-стабилизаторов упрочняют титан, образуя α- и β-твердые растворы.

В зависимости от содержания указанных элементов можно получить сплавы с α+β- и β-структурой.

Таким образом, по структуре титановые сплавы условно делятся на три группы: сплавы с α-, (α+β)- и β-структурой.

В структуре каждой группы могут присутствовать интерметаллидные фазы.

Преимущество двухфазных (α+β)-сплавов – способность упрочняться термической обработкой (закалкой и старением), что позволяет получить существенный выигрыш в прочности и жаропрочности.

# Особенности титановых сплавов.

Одним из важных преимуществ титановых сплавов перед алюминиевыми и магниевыми сплавами является жаропрочность, которая в условиях практического применения с избытком компенсирует разницу в плотности (магний 1,8, алюминий 2,7, титан 4,5). Превосходство титановых сплавов над алюминиевыми и магниевыми сплавами особенно резко проявляется при температурах выше 300°С. Так как при повышении температуры прочность алюминиевых и магниевых сплавов сильно уменьшается, а прочность титановых сплавов остается высокой.

Титановые сплавы по удельной прочности (прочности, отнесенной к плотности) превосходят большинство нержавеющих и теплостойких сталей при температурах до 400°С – 500°С. Если учесть к тому же, что в большинстве случаев в реальных конструкциях не удается полностью использовать прочность сталей из-за необходимости сохранения жесткости или определенной аэродинамической формы изделия (например, профиль лопатки компрессора), то окажется, что при замене стальных деталей титановыми можно получить значительную экономию в массе.

Еще сравнительно недавно основным критерием при разработке жаропрочных сплавов была величина кратковременной и длительной прочности при определенной температуре. В настоящее время можно сформулировать целый комплекс требований к жаропрочным титановым сплавам, по крайней мере для деталей авиационных двигателей.

В зависимости от условий работы обращается внимание на то или иное определяющее свойство, величина которого должна быть максимальной, однако сплав должен обеспечивать необходимый минимум и других свойств, как указано ниже.

1. *Высокая кратковременная и длительная прочность во всем интервале рабочих температур*. Минимальные требования: предел прочности при комнатной температуре 100· Па; кратковременная и 100-ч прочность при 400° С – 75· Па. Максимальные требования: предел прочности при комнатной температуре 120· Па, 100-ч прочность при 500° С – 65· Па.



2. *Удовлетворительные пластические свойства при комнатной температуре:* относительное удлинение 10%, поперечное сужение 30%, ударная вязкость 3· Па·м. Эти требования могут быть для некоторых деталей и ниже, например для лопаток направляющих аппаратов, корпусов подшипников и деталей, не подверженных динамическим нагрузкам.



3. *Термическая стабильность.* Сплав должен сохранять свои пластические свойства после длительного воздействия высоких температур и напряжений. Минимальные требования: сплав не должен охрупчиваться после 100-ч нагрева при любой температуре в интервале 20 – 500°С. Максимальные требования: сплав не должен охрупчиваться после воздействия температур и напряжений в условиях, заданных конструктором, в течение времени, соответствующего максимальному заданному ресурсу работы двигателя.

4. *Высокое сопротивление усталости при комнатной и высоких температурах.* Предел выносливости гладких образцов при комнатной температуре должен составлять не менее 45% предела прочности, а при 400° С – не менее 50% предела прочности при соответствующих температурах. Эта характеристика особенно важна для деталей, подверженных вибрациям в процессе работы, как, например, лопатки компрессоров.

5. *Высокое сопротивление ползучести.* Минимальные требования: при температуре 400° С и напряжении 50· Па остаточная деформация за 100 ч не должна превосходить 0,2%. Максимальным требованием можно считать тот же предел при температуре 500° С за 100 ч. Эта характеристика особенно важна для деталей, подверженных в процессе работы значительным растягивающим напряжениям, как, например, диски компрессоров.



Однако со значительным увеличение ресурса работы двигателей правильнее будет базироваться на продолжительности испытания не 100 ч, а значительно больше - примерно 2000 – 6000 ч.

Несмотря на высокую стоимость производства и обработки титановых деталей, применение их оказывается выгодным благодаря главным образом повышению коррозионной стойкости деталей, их ресурса и экономии массы.

Стоимость титанового компрессора значительно выше, чем стального. Но в связи с уменьшением массы стоимость одного тонно-километра в случае применения титана будет меньше, что позволяет очень быстро окупить стоимость титанового компрессора и получить большую экономию.

# Влияние примесей на титановые сплавы.

Кислород и азот, образующие с титаном сплавы типа твердых растворов внедрения и металлидные фазы, существенно снижают пластичность титана и являются вредными примесями. Кроме азота и кислорода, к числу вредных для пластичности титана примесей следует отнести также углерод, железо и кремний.

Из перечисленных примесей азот, кислород и углерод повышают температуру аллотропического превращения титана, а железо и кремний понижают ее. Результирующее влияние примесей выражается в том, что технический титан претерпевает аллотропическое превращение не при постоянной температуре (882° С), а на протяжении некоторого температурного интервала, например 865 – 920° С (при содержании кислорода и азота в сумме не более 0,15%).

Подразделение исходного губчатого титана на сорта, различающиеся по твердости, основано на разном содержании указанных примесей. Влияние этих примесей на свойства изготовляемых из титана сплавов столь значительно, что должно специально учитываться при расчете шихты, чтобы получить механические свойства в нужных пределах.

С точки зрения обеспечения максимальной жаропрочности и термической стабильности титановых сплавов все эти примеси, за исключением, вероятно, кремния, должны считаться вредными и содержание их желательно свести к минимуму. Дополнительное упрочнение, даваемое примесями, совершенно не оправдывается из-за резкого снижения термической стабильности, сопротивления ползучести и ударной вязкости. Чем более легированным и жаропрочным должен быть сплав, тем ниже должно быть в нем содержание примесей, образующих с титаном твердые растворы типа внедрения (кислород, азот).

При рассмотрении титана как основы для создания жаропрочных сплавов необходимо учитывать возрастание химической активности этого металла по отношению к атмосферным газам и водороду. В случае активированной поверхности титан способен поглощать водород при комнатной температуре, а при 300° С скорость поглощения водорода титаном очень высока. Окисная пленка, всегда имеющаяся на поверхности титана, надежно защищает металл от проникновения водорода. В случае наводороживания титановых изделий при неправильном травлении водород можно удалить из металла вакуумным отжигом. При температуре выше 600° С титан заметно взаимодействует с кислородом, а выше 700° С – с азотом.

# Основные диаграммы состояния.

При сравнительной оценке различных легирующих добавок к титану для получения жаропрочных сплавов основным вопросом является влияние добавляемых элементов на температуру полиморфного превращения титана. Процесс полиморфного превращения любого металла, в том числе и титана, характеризуется повышенной подвижностью атомов и, как следствие, снижением в этот момент прочностных характеристик наряду с повышением пластичности. На примере жаропрочного титанового сплава ВТ3-1 видно, что при температуре закалки 850° С резко снижается предел текучести и меньше - прочность. Поперечное сужение и относительное удлинение при этом достигают максимума. Объясняется это аномальное явление тем, что стабильность β-фазы, зафиксированной при закалке, может быть различной в зависимости от состава ее, а последнее определяется температурой закалки. При температуре 850° С фиксируется настолько не стабильная β-фаза, что ее распад можно вызвать приложением внешней нагрузки при комнатной температуре (т. е. в процессе испытания образцов на растяжение). В результате сопротивление металла действию внешних сил значительно снижается. Исследованиями установлено, что наряду с метастабильной β-фазой в этих условия фиксируется пластичная фаза, имеющая тетрагональную ячейку и обозначаемая α´´.

Из сказанного ясно, что температура аллотропического превращения – важный рубеж, в значительной мере определяющий максимальную рабочую температуру жаропрочного сплава. Следовательно, при разработке жаропрочных титановых сплавов предпочтительно выбирать такие легирующие компоненты, которые бы не снижали, а повышали температуру превращения.

Подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным превращением. Поскольку температура эвтектоидного превращения может быть весьма низкой ( например, 550° С для системы Ti – Mn), а эвтектоидный распад β-твердого раствора всегда сопровождается нежелательным изменением механических свойств (охрупчивание), то эвтектоидообразующие элементы нельзя считать перспективными легирующими добавками для жаропрочных титановых сплавов. Однако в концентрациях, мало превышающих растворимость этих элементов в α-титане, а также в совокупности с элементами, тормозящими развитие эвтектоидной реакции (молибден в случае хрома и др.), эвтектоидообразующие добавки могут входить в состав современных многокомпонентных жаропрочных титановых сплавов. Но и в этом случае предпочтительнее элементы, имеющие с титаном наиболее высокие температуры эвтектоидного превращения. Например, в случае хрома эвтектоидная реакция протекает при температуре 607, а в случае вольфрама – при 715° С. Можно считать, что сплавы, содержащие вольфрам, будут стабильнее и жаропрочнее сплавов с хромом.

Поскольку для титановых сплавов решающее значение имеет фазовое превращение в твердом состоянии, в основу приводимой ниже классификации положено подразделение всех легирующих элементов и примесей на три большие группы по их влиянию на температуру полиморфного превращения титана. Учитывается также характер образующихся твердых растворов (внедрения или замещения), эвтектоидного превращения (мартенситный или изотермический) и существование металлидных фаз.

Легирующие элементы могут повышать, или понижать температуру полиморфного превращения титана или же мало влиять на нее.

*Схема классификации легирующих элементов для титана.*

Легирующие добавки и примеси

α-стабилизаторы

Нейтральные

элементы

β-стабилизаторы

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

замещения

C N

O

AL

Эл-ты

замещения

Zr Sn

Hf Ge

Эл-ты

замещения

Эл-ты

внедрения

Изоморфные β

V Nb

Mo Ta

Эвтектоидный распад

β-фаза,

фиксируемая

закалкой

β-фаза, не фиксируемая

закалкой

H

Si Cu

Ag Au

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Эл-ты

внедрения

Cr Mn

Fe

# Пути повышения жаропрочности и ресурса.

Повышение жаропрочности и ресурса деталей двигателей – одна из важнейших проблем, для успешного решения которой необходимо постоянное повышение жаропрочности сплавов, улучшение их качества и усовершенствовании технологии изготовления деталей.

Для повышения ресурса необходимо знать величины длительной прочности, ползучести и усталости материалов для соответствующих рабочих температур и срока их службы.

С течением времени, как известно, прочность деталей, работающих под нагрузкой при повышенных температурах, понижается, а следовательно, снижается и запас прочности деталей. Чем выше температура эксплуатации деталей, тем быстрее уменьшается длительная прочность, а следовательно, и запас прочности.

Увеличение ресурса означает и увеличение числа запусков и остановок. Поэтому при выборе материалов необходимо знать их длительную прочность и усталость при циклическом нагружении.

На ресурс также сильно влияет технология изготовления деталей, например наличие остаточных растягивающих напряжений может снижать усталостную прочность в 2 – 3 раза.

Улучшение методов термической и механической обработки, позволяющее получать детали с минимальными остаточными напряжениями, является важным фактором в повышении их ресурса.

Фреттинг-коррозия, возникающая при механическом трении, значительно снижает усталостную прочность, поэтому разрабатываются методы повышения фрикционных свойств, ресурса и надежности (металлизация, смазки типа ВАП и др.).

При использовании методов поверхностного упрочнения (наклеп), создающих в поверхностном слое напряжения сжатия и увеличивающих твердость, повышаются прочность и долговечность деталей, особенно их усталостная прочность.

Титановые сплавы для деталей компрессоров начали применяться в отечественной практике с 1957 г в небольшом количестве главным образом на ТРД военного назначения, где требовалось обеспечить надежную работу деталей с ресурсом 100 – 200 ч.

За последние годы увеличился объем применения титановых сплавов в компрессорах авиадвигателей гражданских самолетов длительного ресурса. При этом потребовалось обеспечение надежной работы деталей в течение 2000 ч и более.

Увеличение ресурса деталей из титановых сплавов достигается путем:

А) повышения чистоты металла, т. е. снижения в сплавах содержания примесей;

Б) улучшения технологии изготовления полуфабрикатов для получения более однородной структуры;

В) применения упрочняющих режимов термической или термомеханической обработки деталей;

Г) выбор рационального легирования при разработке новых более жаропрочных сплавов;

Д) использования стабилизирующего отжига деталей;

Е) поверхностного упрочнения деталей;

## Повышение чистоты сплавов.

В связи с увеличением ресурса деталей из титановых сплавов повышаются требования к качеству полуфабрикатов, в частности к чистоте металла в отношении примесей. Одна из наиболее вредных примесей в титановых сплавах – кислород, так как повышенное содержание его может привести к охрупчиванию. Наиболее ярко отрицательное влияние кислорода проявляется при изучении термической стабильности титановых сплавов: чем выше содержание кислорода в сплаве, тем быстрее и при более низкой температуре наблюдается охрупчивание.

Некоторая потеря прочности за счет снижения вредных примесей в титане с успехом компенсируется повышением в сплавах содержания легирующих элементов.

Дополнительное легирование сплава ВТ3-1 (в связи с повышением чистоты губчатого титана) позволило значительно повысить характеристики жаропрочности сплава после изотермического отжига: предел длительной 100-ч прочности при 400° С повысился 60· до 78· Па и предел ползучести с 30· до 50· Па, а при 450° С на 15 и 65% соответственно. При этом обеспечено повышение термической стабильности сплава.



В настоящее время при выплавке сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18 и др. применяется титановая губка марок ТГ-100, ТГ-105, в то время как ранее для этой цели использовалась губка ТГ-155-170. В связи с этим содержание примесей значительно снизилось, а именно: кислорода в 2,5 раза, железа в 3 – 3,5 раза, кремния, углерода, азота в 2 раза. Можно предположить, что при дальнейшем повышении качества губки твердость по Бринеллю ее в ближайшее время достигнет 80· – 90· Па.



Было установлено, что для повышения термической стабильности указанных сплавов при рабочих температурах и ресурсе 2000 ч и более содержание кислорода не должно превышать 0,15% в сплаве ВТ3-1 и 0,12% - в сплавах ВТ8, ВТ9, ВТ18.

## Получение оптимальной микроструктуры.

Как известно, структура титановых сплавов формируется в процессе горячей деформации и в отличие от стали тип структуры не претерпевает существенных изменений в процессе термической обработки. В связи c этим особое внимание должно быть уделено схемам и режимам деформации, обеспечивающим получение требуемой структуры в полуфабрикатах.

Установлено, что микроструктуры равноосного типа (I тип) и типа корзиночного плетения (II тип) имеют неоспоримое преимущество перед структурой игольчатого типа (III тип) по термической стабильности и усталостной прочности.

Однако по характеристикам жаропрочности микроструктура I типа уступает микроструктурам II и III типа.

Поэтому в зависимости от назначения полуфабриката оговаривается тот или иной тип структуры, обеспечивающий оптимальное сочетание всего комплекса свойств для требуемого ресурса работы деталей.

## Повышение прочностных свойств термической обработкой.

Поскольку двухфазные (α+β)-титановые сплавы могут упрочняться термической обработкой, имеется возможность дополнительно повысить их прочность.

Оптимальными режимами упрочняющей термической обработки с учетом ресурса 2000 ч являются:

для сплава ВТ3-1 закалка в воду с температуры 850 – 880° С и последующее старение при 550° С в течение 5 ч с охлаждением на воздухе;

для сплава ВТ8 – закалка в воду с температуры 920° С и последующее старение при 550° С в течение 6 ч с охлаждением на воздухе;

для сплава ВТ9 закалка в воду с температуры 925° С и последующее старение при 570° С в течение 2 ч и охлаждение на воздухе.

Были проведены исследования по влиянию упрочняющей термической обработки на механические свойства и структуру сплава ВТ3-1 при температурах 300, 400, 450° С для сплава ВТ8 за 100, 500 и 2000 ч, а также на термическую стабильность после выдержки до 2000 ч.

Эффект упрочнения от термической обработки при кратковременных испытаниях сплава ВТ3-1 сохраняется до 500° С и составляет 25 – 30% по сравнению с изотермическим отжигом, а при 600° С предел прочности закаленного и состаренного материала равен пределу прочности отожженного материала.

Применение упрочняющего режима термической обработки также повышает и пределы длительной прочности за 100 ч на 30% при 300° С, на 25% при 400° С и 15% при 450° С.

С увеличением ресурса от 100 до 2000 ч длительная прочность при 300° С почти не изменяется как после изотермического отжига, так и после закалки и старения. При 400° С закаленный и состаренный материал разупрочняется в большей степени, чем отожженный. Однако абсолютное значение длительной прочности за 2000 ч у закаленных и состаренных образцов выше, чем у отожженных. Наиболее резко снижается длительная прочность при 450° С, и при испытании в течение 2000 ч преимуществ от термического упрочнения не остается.

Аналогичная картина наблюдается и при испытании сплава на ползучесть. После упрочняющей термической обработки предел ползучести при 300° С выше на 30% и при 400° С – на 20%, а при 450° С даже ниже, чем у отожженного материала.

Также повышается выносливость гладких образцов при 20 и 400° С на 15 – 20%. При этом после закалки и старения отмечена большая вибрационная чувствительность к надрезу.

После длительной выдержки ( до 30000 ч) при 400° С и испытания образцов при 20° С пластические свойства сплава в отожженном состоянии сохраняются на уровне исходного материала. У сплава, подвергнутого упрочняющей термической обработке, несколько снижаются поперечное сужение и ударная вязкость, однако абсолютное значение после 30000-ч выдержки остаются достаточно высокими. С повышением температуры выдержки до 450° С снижается пластичность сплава в упрочненном состоянии после 20000 ч выдержки, поперечное сужение падает с 25 до 15%. Образцы, выдержанные 30000 ч при 400° С и испытанные при той же температуре, имеют более высокие значения прочности по сравнению с исходным состоянием (до нагрева) при сохранении пластичности .

С помощью рентгеноструктурного фазового анализа и электронноструктурного микроисследования установлено, что упрочнение при термической обработке двухфазных (α+β)-сплавов достигается за счет образования при закалке метастабильных β-, α´´- и α´-фаз и распада их при последующем старении с выделением дисперсных частиц α- и β- фаз.

Установлено весьма интересное явление существенного повышения длительной прочности сплава ВТ3-1 после предварительной выдержки образцов при меньших нагрузках. Так, при напряжении 80· Па и температуре 400° С образцы разрушаются уже при нагружении, а после предварительной 1500-ч выдержки при 400° С под напряжением 73· Па они выдерживают напряжение 80· Па в течении 2800 ч. Это создает предпосылки для разработки специального режима термической обработки под напряжением для повышения длительной прочности.



## Выбор рационального легирования.

Для повышения жаропрочности и ресурса титановых сплавов применяется легирование. При этом очень важно знать при каких условиях и в каких количествах следует добавлять легирующие элементы.

Для повышения ресурса сплава ВТ8 при 450 – 500° С, когда снимается эффект упрочнения от термической обработки, было использовано дополнительное легирование его цирконием (1%).

Легирование сплава ВТ8 цирконием (1%), по данным позволяет значительно повысить его предел ползучести, причем действие добавки циркония при 500 более эффективно, чем при 450° С. С введением 1% циркония при 500° С предел ползучести сплава ВТ8 за 100 ч увеличивается на 70%, за 500 ч – на 90% и за 2000 ч на 100% (с 13· до 26· Па), а при 450° С – повышается на 7 и 27% соответственно.



## Стабилизирующий отжиг.

Стабилизирующий отжиг широко применяется для лопаток турбин ГТД с целью снятия напряжений, возникающих на поверхности деталей при механической обработке. Этот отжиг проводят на готовых деталях при температурах, близких к эксплуатационным. Аналогичная обработка была опробована на титановых сплавах, применяемых для лопаток компрессора. Стабилизирующий отжиг проводили в воздушной атмосфере при 550° С в течении 2 ч и изучали его влияние на длительную и усталостную прочность сплавов Вт3-1, ВТ8, ВТ9, и ВТ18. Было установлено, что стабилизирующий отжиг не влияет на свойства сплава ВТ3-1.

Выносливость сплавов ВТ8 и ВТ9 после стабилизирующего отжига повышается на 7 – 15%; длительная прочность этих сплавов не изменяется. Стабилизирующий отжиг сплава ВТ18 позволяет повысить его жаропрочность на 7 – 10%, при этом выносливость не изменяется. То, что стабилизирующий отжиг не влияет на свойства сплава ВТ3-1, можно объяснить устойчивостью β-фазы вследствие применения изотермического отжига. В сплавах ВТ8 и ВТ9, подвергаемых двойному отжигу, из-за меньшей устойчивости β-фазы происходит достаривание сплавов (при стабилизирующем отжиге), что повышает прочность, а следовательно, и выносливость. Так как механическую обработку лопаток компрессоров из титановых сплавов, на финишных операциях проводят вручную, на поверхности лопаток возникают напряжения, разные по знаку и величине. Поэтому рекомендуется все лопатки подвергать стабилизирующему отжигу. Отжиг проводят при температурах 530 – 600° С. Стабилизирующий отжиг обеспечивает повышение выносливости лопаток из титановых сплавов не менее чем на 10 – 20 %.

# Используемая литература.

1. О. П. Солонина, С. Г. Глазунов. «Жаропрочные титановые сплавы». Москва «Металлургия» 1976 г.