

1544696

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА

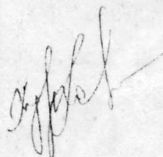
На правах рукописи

УРХАНОВ КРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ
($\alpha + \beta$) - ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка
металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1994

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана.

научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники России
профессор, доктор технических наук
А.Г.Рахштадт

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
Ю.К. Ковнеристый,
доцент, кандидат технических наук
В.Н. Климов.

Ведущая организация: Государственное предприятие "Производственное объединение Красногорский механический завод им. С.А.Зверева.

Защита диссертации состоится "28" февраля 1994 г. на заседании Совета К.053.15.13 Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией
умена.

Н.Э.Ба-

Телефон для связи
Автореферат раз

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
К.Т.Н., до

Щубин

Подписано к печати
Заказ №

1544696



1544696

Урханов Ю. А. Разработка те

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность проблемы. Титановые сплавы обладают уникальной комбинацией свойств, таких как высокая прочность, низкий модуль упругости, низкая плотность, высокая коррозионная стойкость, что позволяет при соответствующем проектировании получать более легкие и компактные упругие элементы по сравнению с такими же элементами, но изготовленными из других пружинных материалов.

Задача снижения веса конструкций и, в том числе, пружин является актуальной в таких ведущих отраслях промышленности, как авиационная, космическая и автомобилестроительная.

Несмотря на указанные преимущества титановых сплавов, в настоящее время в СНГ они мало используются в качестве материала для изготовления упругих элементов из-за отсутствия достаточно систематических исследований их пружинных свойств. Известно, что для титана и его сплавов характерно явное проявление низкотемпературной ползучести. Поэтому задача повышения комплекса пружинных свойств, особенно сопротивления малым пластическим деформациям, от которого зависит и эта ползучесть, требует в настоящее время эффективного решения.

Среди различных методов ее решения, включающих термическую и термомеханическую обработку, особое место занимает способ динамического старения (ДС) или старение под нагрузкой. Напряжения, действующие в процессе ДС, влияют на структуру и субструктуру сплавов, вызывая изменения плотности и взаимного расположения дислокаций, морфологии и пространственного расположения частиц упрочняющих фаз, а также на уровень микронапряжений. Перечисленные изменения структурного состояния сплавов существенно повышают свойства, определяющие сопротивление малым и умеренным пластическим деформациям как в условиях кратковременного, так и в условиях длительного, в том числе циклического нагружения, а также сопротивление разрушению. Все это определяет большую стабильность свойств и повышение надежности упругих элементов, что имеет несомненное практическое значение.

В настоящее время отсутствуют данные о влиянии динамического старения на структуру и свойства титановых сплавов. Поэтому, использование процесса ДС в целях повышения пружинных свойств титановых сплавов представляет определенный интерес.



1544696

Цель работы. Изучение закономерностей влияния напряжений в процессе старения (или достаривания) на структуру и свойства ($\alpha + \beta$) - титанового сплава BT16, являющегося перспективным для его применения в качестве материала для изготовления упругих элементов, и разработка оптимальных режимов упрочняющей термической обработки этого сплава на основе использования ДС.

Научная новизна. Установлена зависимость уровня упрочнения ($\alpha + \beta$) - титановых сплавов при ДС от величины напряжений от внешней нагрузки и показано, что максимум упрочнения достигается при их значениях, превышающих предел текучести сплава, т.е. в условиях динамического деформационного старения. В то же время на большинстве сталей и сплавов, на которых ранее наблюдался положительный эффект ДС, максимум свойств достигается при напряжениях не выше $0,65 \sigma_{0.2}$. В работе было доказано, что именно совмещение деформационного наклепа и напряжений от внешней нагрузки в процессе старения закаленного сплава (ДДС) или в процессе достаривания предварительно изотермически состаренного сплава BT16 (ДДД) позволяет заметно повысить комплекс пружинных свойств этого сплава.

Установлена связь между исходным структурным состоянием сплава, полученным после закалки, закалки и предварительного старения и достигаемым в результате ДДС или ДДД, соответственно, уровнем пружинных свойств. Показано, что в результате ДДС образуется неоднородная метастабильная структура. В объеме β - зерен происходит образование кристаллов мартенситной α'' - фазы. В α - зернах в результате ДДС появляются двойники различной морфологии. Вместе с тем, наличие пластинок α'' - фазы переменной толщины с дефектными границами, представляющие собой дислокационные ансамбли типа дисклинаций с краевой и поворотной компонентами, с также возможность изменения таких параметров структуры, как: толщина слоев в пластине α'' - фазы, степень их взаимокompенсированных сдвигов и разворотов облегчают релаксацию напряжений, тормозят разрушение и увеличивают внутреннее трение сплава, что позволяет повысить его демпфируемость.

Показано, что оптимальное структурное состояние, обеспечивающее максимальный эффект улучшения пружинных свойств, достигается в результате динамического деформационного достаривания после предварительного изотермического старения. При этом, структурные изме-

нения происходят, в основном, в пределах исходных β - зерен, но на порядок в меньшем масштабе, чем при ДС закаленного сплава. Показано, что пластинчато-игловатая структура в ходе ДДД претерпевает дополнительную фрагментацию, происходит переориентация частиц α - фазы в пределах β - зерен. Возможным фактором такой фрагментации является дополнительное образование в областях β - фазы мелких пластин α'' - фазы.

Определены оптимальные значения основных параметров нового типа термической обработки, основанном на использовании ДДС или ДДД, и обеспечивающего достижение высокого комплекса пружинных свойств ($\alpha + \beta$) - титановых сплавов.

Практическая ценность работы. На основе установленных закономерностей разработана технология нового процесса упрочнения пружин из ($\alpha + \beta$) - титановых сплавов, основанная на использовании закалки, предварительного изотермического старения и динамического деформационного достаривания. Процесс опробован при обработке цилиндрических витых пружин сжатия из сплава ВТ16. Опытная партия пружин прошла стендовые испытания на ПО "Авиаагрегат" г. Самара. Показано, что этот процесс повышает усталостную прочность, уменьшает величину релаксации напряжений и в итоге повышает эксплуатационную надежность пружин. Указанные процессы рекомендованы для внедрения в соответствующей отрасли.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на международной конференции молодых ученых, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, октябрь 1992 г. и в рекомендациях, представленных в научно-технических отчетах МГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 статья.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов и приложения. Работа изложена на 70 - страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок, 6 таблиц и список использованной литературы из 93 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки технологии упрочняющей обработки ($\alpha + \beta$) - титановых сплавов для пружин и сформулирована цель работы.

В первой главе представлен обзор имеющихся в литературе данных о влиянии структурных факторов на пружинные свойства сплавов и сталей и, прежде всего, на сопротивление микропластическим деформациям. Показано, что с повышением сопротивления микропластическим деформациям могут быть увеличены значения рабочих нагрузок на упругий элемент, уменьшается вероятность возникновения остаточных деформаций при случайных перегрузках, возрастает релаксационная стойкость, в меньшей степени развиваются такие неупругие явления, как гистерезис и упругое последействие, повышается предел выносливости. Описаны различные способы термической и термомеханической обработок, позволяющие повысить комплекс пружинных свойств сплавов.

Весьма эффективным способом повышения пружинных свойств сплавов является старение под напряжением или динамическое старение. Эффект от динамического старения удалось получить на сплавах с различными кристаллическими решетками как матрицы, так и выделяющейся фазы. Несмотря на различие в исходной структуре и ее изменениях в процессе динамического старения, в исследованных ранее сплавах наблюдается одинаковый характер изменения свойств - значительный рост сопротивления малым пластическим деформациям и релаксационной стойкости при относительно незначительном повышении пределов текучести и прочности. Авторы этих исследований связывают положительный эффект влияния динамического старения (или динамического достаривания) с ростом дисперсности и изменением морфологии выделений, с увеличением дораспада твердого раствора, с изменением ориентировки частиц выделений (плоскость габитуса частиц становится параллельной или почти параллельной направлению прикладываемой нагрузки) и, наконец, с формированием в полях напряжений особой субструктуры сплава. Следует подчеркнуть, что эффективность динамического старения не зависит от схемы (одноосное растяжение или кручение) и условий нагружения, так как при этом происходят одни и те же субструктурные и структурные изменения. Динамическое старение оказалось эффективным способом повышения пружинных свойств и в том случае, когда сплавы предварительно подвергались холодной пластической деформации.

Следует особо подчеркнуть, что несмотря на возможную эффективность динамического старения для улучшения свойств титановых спла-

вов этот процесс до настоящего времени не изучался и не применялся.

Представлен обзор механических и технологических свойств наиболее широко распространенных $(\alpha + \beta)$ - титановых сплавов, основные принципы их легирования. Показано, что из-за низкого значения плотности удельный предел прочности и удельный предел упругости у $(\alpha + \beta)$ - титановых сплавов выше, чем соответствующие характеристики других пружинных сплавов.

Рассмотрены основные схемы фазовых превращений в процессе закалки и старения $(\alpha + \beta)$ - сплавов. Отмечено, что упрочнение в этих сплавах происходит за счет выделения частиц α - фазы либо непосредственно из β - фазы, либо через ряд промежуточных превращений. Следовательно, необходимо влиять на процессы промежуточных фазовых превращений с целью получения структуры с дисперсными, равномерно распределенными по объему зерна и благоприятно ориентированными частицами α - фазы.

В целом, $(\alpha + \beta)$ - титановые сплавы обладают отличным сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Они характеризуются высокой пластичностью как в отожженном, так и в закаленном состоянии, способностью к значительному упрочнению при термической обработке, высокой коррозионной стойкостью, меньшей, чем у α - сплавов склонностью к водородной хрупкости. Однако, их пружинные свойства почти не изучены.

В конце главы приведены обоснование выбора материала и постановка задачи.

Выбор для исследований двухфазного $(\alpha + \beta)$ - титанового сплава BT16 объясняется широкими возможностями регулирования в нем степени распада метастабильных фаз как в условиях термической обработки, так и при пластической деформации с целью формирования структуры, обеспечивающей высокое сопротивление малым пластическим деформациям и необходимые служебные свойства упругих элементов. Кроме того, сплав BT16 специально был разработан в СССР для изготовления деталей крепления и поэтому его состав выбран с таким расчетом, чтобы обеспечить повышенное сопротивление релаксации напряжений и высокое сопротивление срезу (как известно, максимальные напряжения, возникающие в сечении витка пружины являются касательными).

Основной задачей работы было установление закономерностей меж-

ду структурным состоянием сплава ВТ16, формирующимся при термической обработке и, в частности, в условиях динамического старения или достаривания и в том числе под влиянием возникающей в процессе ДС пластической деформации, и сопротивление малым пластическим деформациям при кратковременном и длительном, а также циклическом нагружении.

Во второй главе описаны некоторые методики экспериментальных исследований.

Динамическое старение в условиях кручения проводилось на специальной установке, изготовленной и усовершенствованной в МГТУ им. Н.Э.Баумана. Конструкция установки позволяет измерять крутящий момент с точностью 0,001 нм. Установка снабжена оптико-механической системой для измерения остаточной деформации сдвига с точностью до 0,001 %. На установке проводилось измерение условных характеристик сопротивления сдвигу: предела упругости с допуском на остаточную деформацию 0,005 %, 0,01 %, предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и предела прочности (σ_B), релаксационной стойкости при комнатной и повышенных температурах.

Анализ фазового и структурного строения сплава после различных вариантов термической обработки проводили с помощью рентгенографических, металлографических и электронномикроскопических исследований. Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-4 с использованием $\text{Co-K}\alpha$ излучения. Металлографические исследования с количественной оценкой морфологии проводили на установке "Videolab" (Англия - Япония). Электронномикроскопические исследования проводились на электронном микроскопе JEM 200CX методом просвечивающей электронной микроскопии и микродифракции с использованием темнопольных изображений.

Третья глава посвящена изучению влияния предварительной термической обработки, динамического старения, динамического достаривания, динамического деформационного старения и динамического деформационного достаривания на структурное состояние и уровень механических свойств сплава ВТ16 и, особенно, на сопротивление малым пластическим деформациям.

Прежде всего, было изучено влияние динамического старения на структуру и свойства сплава ВТ16 в различном исходном состоянии - после закалки и после старения при температуре 300 - 600 °С и про-

должительности от 1 до 50 ч.

Установлены закономерности изменения свойств закаленного сплава ВТ16 в процессе динамического старения при 400 - 500 °С в течение 1-10 ч и напряжении 100 - 700 МПа. Показано, что в пределах этих режимов ДС наблюдается повышение пределов прочности и текучести в соответствии с ростом величины напряжений, возникающей от внешней нагрузки. В то же время величина предела упругости ($\sigma_{0,005}$ и $\sigma_{0,01}$) остается практически на том же уровне, что и в исходном (закаленном) состоянии.

При динамическом старении ($T = 400 - 500$ °С) сплава ВТ16 после его закалки и предварительного старения при 300 - 600 °С в течение 1... 50 ч, т.е. когда этот вид обработки отвечал динамическому состариванию, как и в предыдущем случае также наблюдается рост пределов прочности и текучести, но предел упругости оставался на исходном уровне. Однако динамическое старение, проведенное в условиях действия напряжений, превышающих предел текучести сплава ($\sigma = 1,2...1,3\sigma_{0,3}$) и вызывающих пластическую деформацию, независимо от исходной обработки - закалка или старение, приводит к значительному росту прочностных свойств, особенно предела упругости. Так, например, после закалки и последующего динамического старения в указанных условиях при 450 °С в течение 2 ч, т.е. при действии возникающей при этом пластической деформации, предел прочности (σ_B) повышается от 820 до 860 МПа, предел текучести ($\sigma_{0,3}$) - от 470 до 550 МПа, а предел упругости ($\sigma_{0,005}$) - от 250 до 470 МПа, т.е. почти в два раза.

Процесс динамического старения в указанных условиях протекания такой заметной пластической деформации целесообразно называть динамическим деформационным старением (ДДС). Установлены закономерности ДДС и показано, что наибольший эффект улучшения свойств сплава ВТ16 достигается в том случае, если предварительно сплав подвергался закалке и изотермическому старению на максимум свойств прочности при - 550 °С, 8 ч, а затем уже динамическому деформационному старению, а точнее динамическому деформационному состариванию (ДДС) при 450 °С, 1,5 ч и напряжении 600 - 650 МПа.

Приведенный оптимальный режим ДДС обеспечивает следующий комплекс механических свойств: $\sigma_{0,005} = 650$ МПа, $\sigma_{0,01} = 640$ МПа, $\sigma_{0,3} = 700$ МПа, $\sigma_B = 1000$ МПа.

Показано, что достигаемый в результате ДДС комплекс механических свойств оказывается ниже, чем после ДДД. Предполагается, что этот эффект является результатом достижения после ДДС, менее метастабильного состояния структуры сплава, чем после ДДС.

В главе 4 приведены результаты электронномикроскопических исследований структуры сплава ВТ16 после ДДС и ДДД, что позволяет установить природу изменения свойств после этих обработок. Электронномикроскопические исследования сплава ВТ16 после ДС показали, что в структуре подавляющее количество зерен имеет пластинчатую структуру. Характерно, что пластинки в α и β - фазах имеют разную природу. В зернах β - фазы - это две системы пластин α'' - фазы различного размера. Наличие мартенситной фазы α'' в структуре динамически деформационно состаренного образца при достаточно высокой температуре старения ранее в структурных исследованиях титановых сплавов не наблюдалось.

В зернах α - фазы видны двойники деформации различной морфологии, возникшие в процессе деформаций, сопутствующей ДДС. Таким образом, в результате ДДС наблюдается неоднородная метастабильная структура, в которой развивается микропластическая деформация.

Структурные изменения при динамическом деформационном состаривании, после предварительного изотермического старения, происходят в основном в зернах β - фазы. Пластинчато-игловатая структура, полученная после старения, претерпевает после ДДД дополнительную фрагментацию, которая может быть обусловлена следующими факторами. В частности, образованием дисперсной субзеренной структуры в ходе накопления и перераспределения дислокаций. Возможным стимулом фрагментации структуры является локальное образование рекристаллизованных зерен при повышенной температуре состаривания. Также происходит переориентация частиц α - фазы в объеме β - зерен. Протяженность дужек у основных углов обратной решетки, а, следовательно, и суммарная степень разориентировки в пределах одного зерна достигает 10 - 12 °. Дополнительно происходит образование пластин α'' - фазы в областях β - фазы, что свидетельствует о процессе распада.

Таким образом, в результате ДДД сплав ВТ16 приобретает высоко дисперсную и достаточно равномерную структуру. Важно отметить, что данная структура, помимо повышения предела упругости обеспечивает

также и увеличение релаксационной стойкости сплава. Именно поэтому на основе этого процесса и разработана технология упрочняющей обработки пружин.

Главы 5 и 6 посвящены разработке технологического процесса изготовления и термообработки цилиндрических витых пружин сжатия из сплава ВТ16 и промышленному опробованию опытных партий пружин, термически обработанных по установленным оптимальным режимам с применением закалки 820 °С, предварительного изотермического старения 550 °С, 8 ч и динамического деформационного состаривания $\tau_0 = 650$ МПа, $T = 450$ °С, $\tau_{\text{выд}} = 1,5$ ч.

Циклические испытания показали, что после обработки по указанному режиму долговечность пружин повышается на 25 - 30 % по сравнению с обработкой с использованием просто изотермического старения 550 °С, 8 ч. Пружины имеют меньшее коробление и усадку.

Изменения к технологическим процессам рекомендованы к внедрению на ПО "Авиаагрегат" г. Самара.

ВЫВОДЫ:

1. Изучены закономерности влияния таких определяющих параметров термической обработки, как температура, а также напряжение в процессе динамического старения (достаривания) двухфазного титанового сплава ВТ16 на его структуру и механические свойства.

2. Показано, что эффекта улучшения пружинных свойств сплава от ДС при напряжениях, не превышающих предела текучести при изученных температурах старения, практически не наблюдается. Однако, при увеличении напряжения в процессе ДС до уровня выше предела текучести, т.е. когда происходит пластическая деформация (ДДС), наблюдается значительный рост механических свойств сплава ВТ16, и особенно важнейшего для упругих элементов свойства - предела упругости. Так, в результате ДДС ($\tau_0 = 600$ МПа, $T = 450$ °С, $\tau_{\text{выд}} = 2$ ч) закаленного сплава предел упругости ($\tau_{0,005}$) повышается на 40 - 50%.

3. Установлена связь между исходным структурным состоянием сплава ВТ16 и эффектом воздействия ДДС. Показано, что в результате ДДС закаленного сплава структура сплава оказывается метастабильной. В объеме α - зерен происходит образование пластинок мартен-

ситной α'' фазы, а в α - зернах наблюдается активное двойникование.

Наличие дефектных границ в пластинках α'' - фазы, а также большое количество двойников в α - фазе, обуславливает более низкие механические характеристики по сравнению со свойствами сплава после старения без нагрузки ($T = 550^\circ\text{C}$, $t_{\text{внд}} = 8 \text{ ч}$).

Электронномикроскопические исследования показали, что структурные изменения при динамическом деформационном достаривании (ДДД) после предварительного старения происходят в основном в β - зернах, но в объемах на порядок меньшего масштаба, чем в закаленных. В результате ДДД сплав имеет дисперсную и достаточно однородную структуру.

4. Показано, что значения пределов упругости, релаксационной стойкости, долговечности могут быть улучшены при использовании динамического деформационного достаривания. Так, например, динамическое деформационное достаривание после предварительного старения (550°C , 8 ч) при $\sigma_0 = 650 \text{ МПа}$, $T = 450^\circ\text{C}$ и $t_{\text{внд}} = 1,5 \text{ ч}$ позволяет повысить пределы упругости $\sigma_{0,005}$ и $\sigma_{0,01}$ в среднем на 25 - 30 %, релаксационную стойкость - в 3...5 раз, долговечность - на 30 % по сравнению с аналогичными характеристиками после старения 550°C , 8 ч .

5. Разработан оптимальный режим термической и термомеханической обработки ($\alpha + \beta$) - титанового сплава BT16, обеспечивающий получение высоких и стабильных пружинных характеристик. Режим включает следующие операции:

- закалка от критической температуры на максимальное содержание метастабильной β - фазы;
- старение на максимум прочностных свойств при 550°C , $8 - 10 \text{ ч}$;
- динамическое деформационное достаривание $\sigma_0 = 650 \text{ МПа}$, $T = 450^\circ\text{C}$, $t_{\text{внд}} = 1000 \text{ МПа}$.

6. Разработана новая технология процесса упрочнения витых цилиндрических пружин сжатия из ($\alpha + \beta$) - титанового сплава BT16, основанная на использовании закалки, старения и динамического деформационного достаривания. Процесс опробован на опытной партии пружин. Показано, что этот процесс повышает эксплуатационную надежность, усталостную прочность, уменьшает осадку. Указанный процесс рекомендован для внедрения в промышленности.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Каплун Ю.А., Васильев В.Р., Таран Ю.Н., Урханов Ю.А. Влияние динамического старения на механические свойства титанового сплава ВТ16 // Известия ВУЗов: Цветная металлургия. - 1991. - № 4 - С. 107 - - 111.