



The perspectives of development of thermal treatment of $\alpha+\beta$ -titanium alloys are examined.

В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет

УДК 624.71

ОБСУЖДЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ $(\alpha+\beta)$ -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Для успешной конкуренции в авиации с высокопрочными сталями для титановых сплавов необходимо повысить гарантированную прочность в деталях до $\sigma_b = 1180$ МПа (120 кгс/мм²) при удовлетворительных характеристиках пластичности, вязкости разрушения и усталости. Большинство промышленных титановых сплавов основано на двухфазной $(\alpha+\beta)$ -структуре, что обеспечивает возможность широкого варьирования механических свойств путем эффективной термической обработки. Основную ответственность за формирование исходной микроструктуры полуфабрикатов несут режимы деформации. Реальная возможность увеличения применения изделий из этих сплавов, в том числе сварных и крупногабаритных, состоит в дальнейшем изучении возможностей термической обработки, где основной задачей продолжает оставаться вопрос улучшения характеристик структуры, механических и служебных свойств.

Отжиг – наиболее распространенный вид термической обработки титановых сплавов с $(\alpha+\beta)$ -структурой. Промышленные режимы отжигов применяются для варьирования структуры и механических свойств и классифицируются по технологии: простой, изотермический и двойной, сочетая элементы отжига первого и второго родов. По фазовому составу сплавов при температуре выдержки отжига разделяют на $(\alpha+\beta)$ - и β -отжиг. Регламентирование параметров структуры при $(\alpha+\beta)$ -отжиге позволяет получить комплекс свойств при достаточно высокой пластичности. В последние годы показано, что проведение β -отжига позволяет повысить значения вязкости разрушения и жаропрочность. Вредное влияние β -отжига на пластичность можно уменьшить, регулируя параметры структуры сплавов при его проведении, что открывает пути для промышленного использования этого вида отжига. Однако здесь есть еще ряд нерешен-

ных проблем, связанных с нахождением оптимальных параметров структуры. Многие исследователи считают, что для обеспечения оптимального комплекса механических и служебных свойств изделий пока следует применять все же отжиг при температуре $t_{п.п.} = 20-40$ °С, что обеспечивает сочетание достаточно высокой вязкости разрушения, приемлемую циклическую прочность и высокую пластичность.

Упрочняющая термическая обработка для изделий из мало- и среднелегированных $(\alpha+\beta)$ -сплавов является экономически целесообразным способом повышения уровня прочности деталей и позволила бы расширить области их практического использования. Однако этой проблеме уделено недостаточное внимание. В последние годы для этого пытаются применять термическую обработку, включающую закалку (более правильно говорить о высокотемпературной термической обработке) и старение. При закалке обычно происходит фиксирование в структуре метастабильных фаз (α' , α'' , ω , β_n), которые распадаются при последующем старении, образуя частицы дисперсных фаз (α и β), что и приводит к существенному повышению прочности при сохранении необходимого минимума пластичности. Практика показала, что лучшее сочетание прочностных, пластических и эксплуатационных свойств после старения получают при закалке без полиморфного превращения и образования мартенситных фаз. Для $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов можно регулировать склонность к последующему упрочнению при старении, изменяя количество метастабильных фаз варьированием температуры нагрева и условий охлаждения при закалке. Обычно температуру нагрева под закалку выбирают в интервале $800-900$ °С в зависимости от марки сплава с допусаемым изменением температуры в пределах $20-40$ °С для каждого

сплава. На качество закалки также влияет скорость и время нагрева под закалку, так как для сплавов необходимое для закалки равновесие фаз достигается сравнительно медленно. Микроструктура закаленных сплавов и качество упрочнения сильно зависят от температуры нагрева и скорости охлаждения при закалке: правильного выбора охлаждающей среды. Для $(\alpha+\beta)$ -сплавов этот вопрос мало изучен, а в качестве основной охлаждающей среды до настоящего времени применяют воду или воздух. Расширение круга охлаждающих сред для этих сплавов является весьма полезным занятием. Необходимость преодоления отрицательных последствий закалки $(\alpha+\beta)$ -сплавов: снижение пластичности и вязкости после старения, нестабильность и неоднородность механических свойств по сечению полуфабрикатов, привело к поиску возможностей оптимизации режимов закалки. В частности, предложено температуру нагрева под закалку выбирать в интервале $t_{п.п.} = 20-40^\circ\text{C}$, а скорость охлаждения – в пределах $5-20^\circ\text{C}/\text{с}$.

Но все же основной недостаток закалки $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов – ограниченная прокаливаемость и, как следствие, большая неоднородность механических свойств крупногабаритных заготовок после старения практически не преодолен. Не установлены критерии прокаливаемости титановых сплавов. Одни исследователи переносят на эти сплавы характеристики прокаливаемости стали. Другие предполагают, что более верно под прокаливаемостью этих сплавов следует понимать их способность к упрочнению в больших сечениях: критическую скорость при закалке титановых сплавов установить трудно, а упрочнение их зависит от количества зафиксированных метастабильных фаз в структуре и способности их распадаться при последующем старении. Для некоторого снижения неоднородности механических свойств упрочненных крупногабаритных заготовок ранее предлагалось, во-первых, понизить температуру высокотемпературной обработки или нагрев проводить в две ступени: сначала при высокой температуре, затем охлаждать с печью до более низкой температуры, выдерживать и после этого производить охлаждение.

Исследованиям старения $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов посвящено большинство работ, где, в частности, отмечается, что процесс этот не поддается описанию с помощью классической теории дисперсионного твердения, так как структура характеризуется грубой дисперсностью α - и β -фаз, а рост прочности складывается из гетерогенизации структуры за счет дисперсионного распада метастабильных фаз и фазового наклепа. Температура старе-

ния по рекомендациям составляет $0,55-0,6 t_{п.п.}$, а изменение температуры старения может у высоколегированных сплавов приводить к значительному изменению механических свойств в отличие от малолегированных. Длительность старения обычно выбирают больше времени, необходимого для достижения максимальной прочности, чтобы повысить пластичность. С целью выравнивания распада метастабильных фаз в пределах зерна при наличии у полуфабрикатов крупнозернистой структуры и снижения неоднородности механических свойств предложено старение проводить в две ступени: сначала при низкой (равномерное зарождение частиц в объеме), а затем при более высокой температуре (их более совершенный рост).

Проведение ВТМО позволяет повысить прочность $(\alpha+\beta)$ -сплавов за счет фиксации в структуре большего количества метастабильных фаз и более интенсивного и равномерного их распада при старении. Повышению пластичности здесь способствуют дробление зерен и образование полигональной структуры, уменьшение микрон неоднородностей, более равномерное распределение микронапряжений кристаллической решетки, а также более равномерное выделение мелкодисперсной α -фазы в результате старения. Оптимальным режимом ВТМО является закалка после деформации со степенью $40-70\%$ в верхнем интервале температур $(\alpha+\beta)$ -области и последующее старение, что позволяет заметно повысить выносливость, кратковременную и длительную прочность. Сведений о ВТМО крупногабаритных заготовок этих сплавов касается лишь упрочнения плит и поковок из сплава ВТ23.

Механические свойства отожженных сплавов определяются свойствами α - и β -фаз и степенью гетерогенности структуры. Влияние структуры на механические и эксплуатационные свойства отожженных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов ранее рассматривали как простую зависимость от типа микроструктуры: глобулярная, смешанная или пластинчатая, в том числе корзинчатого плетения и колониальная. Однако оценка механических и служебных свойств по типу микроструктуры оказалась недостаточной и противоречивой. Причина противоречия данных о механических и особенно служебных свойствах $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов заключается в сильном влиянии параметров структуры на эти свойства. Было установлено, что механические свойства сплавов с пластинчатой структурой после отжига зависят от величины исходного β -зерна (D), размера внутризеренных колоний α -фазы (d) и толщины α -пластин (b). В общем случае для обеспечения высокого уровня пластичности незави-

симо от химического состава сплава и технологии изготовления полуфабрикатов оптимальными параметрами пластинчатой структуры ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов эти исследователи считают минимально возможный размер β -зерна, α -колонии величиной 30–50 мкм и α -пластины толщиной 3,0–3,5 мкм. Измельчение или укрупнение внутризеренной структуры по отношению к указанным параметрам приводит, по мнению исследователей, к снижению пластичности. По мнению других авторов, удовлетворительный уровень пластичности может быть обеспечен различным сочетанием параметров D , d , b , в том числе и при крупном β -зерне (700–1000 мкм), поскольку близкие к оптимальным размеры α -колоний и толщины α -пластин могут быть получены путем термической обработки. Весьма проблематично наличие α -оторочки вокруг β -зерна, что также должно учитываться в таких исследованиях.

Принято считать, что пластичность, ударная вязкость и усталостная прочность гладких образцов при увеличении размера β -зерна снижаются, а вязкость разрушения и усталостная прочность образцов с острым надрезом увеличиваются. Повышение вязкости разрушения при укрупнении пластинчатой структуры, по мнению ряда исследователей, обусловлено увеличением размеров зоны, в которой развиваются деформация и разрушение, и увеличением необходимой для этого энергии. Об этом, в частности, свидетельствуют более частые и резкие изменения направления движения трещины при разрушении, приводящие к увеличению ее длины с ростом β -зерна. Объяснение механизма повышения вязкости разрушения в пластинчатой структуре ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов основано на концепции, что фаза, имеющая более низкую прочность и большую пластичность, будет затормаживать развитие трещины. Однако одни исследователи считают такой фазой α -фазу, а другие – сохранившуюся между пластинами β -фазу. Таким образом, вязкость разрушения зависит не только от морфологии и распределения α - и β -фаз, но также от их относительной прочности и пластичности. Эти переменные определяются, по-видимому, не только производством сплава, но и процессами термоупрочнения. Наиболее предпочтительным критерием при оценке конструкционной прочности материалов считают характеристики вязкости разрушения (K_{IC} и $CPTU$). Наибольший интерес с этой точки зрения представляют, как уже отмечалось, полуфабрикаты из ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов с пластинчатой структурой, у которых эти характеристики более высокие, что и послужило предметом подробного изучения этого типа структуры.

Здесь следует дать разъяснение о том, что установленные признаки были изучены только для пластинчатых структур, полученных посредством отжига и при значениях прочности сплавов не более 1030 МПа (105 кгс/мм²). Большое число работ посвящено влиянию параметров структуры на усталостную прочность ($\alpha+\beta$)-сплавов после отжига. Помимо заключений о том, что металл с крупнозернистой структурой обладает значительно меньшей усталостной прочностью, чем металл с мелкозернистой структурой, есть мнения, что установить однозначную корреляцию между характеристиками структуры, а также прочностью и поведением металла при усталости пока не удалось.

Межфазные границы (границы раздела α/β -фаз) могут играть решающую роль при разрушении многих ($\alpha+\beta$)-сплавов, являясь местом зарождения микропор и микротрещин и вызывая снижение усталости и преждевременное разрушение, например, уже при растяжении. В этой связи можно отметить, что формирование нужной структуры ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов является основной задачей процесса деформации и термической обработки, в особенности упрочняющей. От условий эксплуатации: уровня действующих напряжений, геометрии детали, запаса упругой энергии конструкции, а также влияния внешней среды, зависит, какое свойство (или группа свойств) окажется определяющим качеством детали. Считается, что для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик полуфабрикатов из ($\alpha+\beta$)-сплавов большого сечения в частности, необходимо устанавливать в зависимости от их назначения тип микроструктуры и уровень прочности в технических условиях на поставку с целью обеспечения оптимального сочетания комплекса свойств для требуемого ресурса изделий. При этом следует учесть, что влияния типа структуры на характеристики пластичности, жаропрочности, усталостной прочности и вязкости разрушения не являются однозначными, а зависят от уровня прочности сплава, температуры, времени и условий испытаний. Но кроме типа структуры, на свойства полуфабрикатов большое влияние оказывают, как уже отмечалось, количественные характеристики микроструктуры. Из всего сказанного следует понять, что в каждом типичном случае необходимо найти оптимальные с позиции механических и служебных свойств количественные характеристики структуры, обеспечивающие полуфабрикатам высокое качество. В связи с использованием при проектировании самолетов принципа безопасной повреждаемости основным критерием оценки материалов, предна-

значенных для работы в жестких условиях, является вязкость разрушения ($СРТУ$, K_{1C}). С точки зрения конструкционных свойств и долговечности конструкций главный показатель – это сопротивление распространению трещины в детали и зависит от материала, его прочности и структуры, а не сопротивление возникновению трещины, которое связано с геометрией детали и состоянием ее поверхности в большей степени, чем со структурой и свойствами материала. Исходя из этого, по мнению многих авторов, предпочтение следует отдавать мелкопластинчатой структуре: более высокая вязкость по сравнению с грубозернистой структурой. Ведь и с точки зрения микроструктуры для деталей, работающих при высоких циклических нагрузках, необходимо стремиться к получению полуфабрикатов из титановых сплавов с мелкозернистой равноосной или пластинчатой структурой с небольшими размерами α -колоний и α -пластин. Опять же, подобные рассуждения не могут рассматриваться в отрыве от конкретного случая применения сплава и без учета уровня его упрочнения. Здесь следует отметить, что для большинства крупногабаритных полуфабрикатов из $(\alpha+\beta)$ -сплавов как качественная, так и количественная оценка структуры фактически не возможна и не производится из-за ярко выраженной структурной неоднородности и низкой воспроизводимости результатов технологии получения одинаковых результатов. Это главный недостаток таких полуфабрикатов, который в конечном итоге приводит к большому разбросу значений механических свойств и низкому их качеству и не дает в полной мере использовать все преимущества $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов. При производстве крупногабаритных полуфабрикатов следует стремиться к получению хорошо проработанной и однородной структуры, а с помощью термической обработки доводить такие структуры до нужных требований, чтобы получить оптимальное сочетание всех нужных свойств полуфабриката, обеспечивающих его качество и надежность.

Отсутствие ранее комплексных исследований по деформации и термической обработке полуфабрикатов сплава ВТ23 ($t_{п.п.} = 920^\circ\text{C}$) и наличие большого их количества на предприятии позволили автору провести работу с целью повышения уровня и однородности механических свойств и показать возможные варианты прогресса в разработке новых и оптимизации известных технологических схем проведения термической обработки. Полученные результаты можно применять и для более и менее легированных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов. Основные научные достижения прове-

денных исследований и главные направления прогресса можно изложить кратко в следующих положениях:

- проведены систематические исследования влияния исходной структуры, толщины, температуры нагрева в верхней части $(\alpha+\beta)$ -области и типа охлаждающей среды на распределение скоростей охлаждения и формирование структурно-фазового состояния и свойств по сечению заготовок из $(\alpha+\beta)$ -титанового сплава ВТ23, определены закономерности влияния исходной структуры, температуры нагрева в $(\alpha+\beta)$ -области и условий охлаждения при закалке на эффективность и однородность упрочнения по сечению заготовок из сплава ВТ23 толщиной от 25 до 160 мм в результате последующего старения и предложена методика прогнозирования эффективности термического упрочнения титановых сплавов, базирующаяся на сравнительных испытаниях свойств заготовок переменного сечения определенной формы при конкретных и равнозначных условиях термической обработки;

- предложены теоретические предпосылки, базирующиеся на учете структурно-напряженного состояния, возникающего в двухфазном сплаве в результате непрерывного охлаждения заготовок с различными скоростями с предварительной выдержкой в течение 2 ч при $700\text{--}850^\circ\text{C}$ ($t_{п.п.} = 220\text{--}70^\circ\text{C}$), и позволяющие объяснить механизмы распада высокотемпературной β -фазы, условия и предпочтительные места образования низкотемпературной α - и α'' -фаз в структуре и уровень свойств в зависимости от конкретного значения скорости охлаждения;

- показано для исходной пластинчатой структуры сплава ВТ23, что при увеличении скорости охлаждения, как и повышении температуры нагрева в $(\alpha+\beta)$ -области при закалке, происходит образование метастабильных фаз (возможно, ω -фазы), значительно отличающихся по своему составу и кристаллическому строению от низкотемпературной α -фазы, а протекание процессов распада при последующем старении из-за больших сжимающих напряжений становится более однородным, глубинным и многостадийным, поэтому формирование частиц мелкодисперсной α -фазы происходит на фоне большого количества центров зарождения (возможно, через образование ω -фазы) и большого несовершенства и значительного напряженного состояния ее кристаллической решетки и не когерентности границ раздела α/β -фаз (здесь также могут быть интерметаллидные зоны), что на практике способствует повышению прочности (наиболее значительно при скорости охлажде-

ния до $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$) и более значительному снижению пластичности сплава (уже при скорости охлаждения до $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$); на основе этого вывода определены оптимальные скорости охлаждения сплава ВТ23 с пластинчатой структурой при закалке, в т. ч. мягкой, с $700\text{--}850^{\circ}\text{C}$ для создания требуемого комплекса механических свойств в результате старения;

- установлено, что на начальном этапе низкотемпературного старения (ниже $t_{\text{п.п.}} = 490^{\circ}\text{C}$) метастабильной β -фазы в горячедеформированном двухфазном сплаве ВТ23 активно протекающий процесс перераспределения легирующих элементов, основном алюминия, между исходными β - и α -фазами без зарождения новых выделений приводит к упрочнению сплава;

- обнаружено влияние скорости охлаждения с температуры старения высоколегированных горячедеформированных $(\alpha+\beta)$ -сплавов на их пластичность, ударную вязкость и трещиностойкость, зависящее от степени их легированности, и определены оптимальные условия охлаждения с температуры старения для сплавов, исключаящие выделение охрупчивающих элементов на границе раздела фаз и способствующие возникновению сжимающих напряжений в их структуре в процессе охлаждения, что, в конечном итоге, способствует повышению комплекса механических и служебных свойств при термическом упрочнении;

- показано положительное влияние кратковременного печного нагрева до температуры на $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ выше температуры предшествовавшего старения на изменение механических свойств термоупрочненного сплава ВТ23 с различной пластинчатой структурой, в том числе и грубой (перегретой), когда достижение значительного выигрыша в пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости на фоне менее значительного и вполне оправданного снижения прочности сплава в данном случае обусловлено растворением наиболее мелкодисперсных частиц α -фазы в структуре термоупрочненного сплава ВТ23 и концентрационными и структурными изменениями, произошедшими на границе раздела α - и β -фаз, а также снятием напряжений во время кратковременного нагрева;

- обобщены исследования упрочнения горячедеформированных полуфабрикатов: плит, поковок, в том числе и переменного сечения, посредством проведения их старения при температуре $430\text{--}500^{\circ}\text{C}$ в течение $8\text{--}10$ ч при промышленном применении и показаны результаты упрочнения образцов плит толщиной от 30 до 160 мм и их взаимосвязь со структурой, а также механические свойства для большого числа плит толщиной 100 мм

разных плавов и их статистический разброс в пределах одной плиты, что создает реальную возможность использования этих полуфабрикатов в авиации;

- проведены на методической основе систематизированные исследования по оценке уровня и однородности упрочнения по сечению кованных полуфабрикатов из $(\alpha+\beta)$ -титанового сплава ВТ23 при последующей термической обработке в зависимости от их толщины ($25\text{--}160$ мм) и условий деформации из $(\alpha+\beta)$ - и β -области: температурный интервалковки, степень деформации и интенсивность охлаждения послековки (для поковок толщиной 100 мм), режимов последеформационных $(\alpha+\beta)$ - и β -отжигов и на основе разработанной методики показано, что сплав в середине сечения поковок имеет менее выраженную по сравнению с наружными слоями способность к упрочнению при равных условиях термической обработки, связанную с особенностями строения структуры, сохраняющими наследственность и после проведения отжига в течение 1 ч в $(\alpha+\beta)$ - или β -области;

- проведение отжига в течение 1 ч поковок, деформированных по различным режимам в $(\alpha+\beta)$ - и β -области, при 860°C не изменяет типа структуры (исключение составляют наружные слои при ускоренном охлаждении поковок послековки в воде или по схеме «воздух-вода») и только увеличивает размеры элементов первичной α -фазы сплава ВТ23; при 950°C – ведет к небольшому увеличению размеров β -зерен и α -оторочки и частичному изменению внутризеренного строения сплава ВТ23: появление структуры «корзинчатого плетения», или эволюции такой структуры до «колониальной» при повышении температуры началаковки до β -области (значительно выше 950°C), а при 1050°C – во всех случаях к формированию структуры с β -превращенными зернами правильной полиэдрической формы с наличием ярко выраженной α -оторочки и колониальному, вполне закономерному расположению длинных α -пластин в пределах β -зерен, а появление закономерностей в строении пластинчатой структуры сплава ВТ23 в результате проведения отжига поковок при 1050°C по сравнению с горячедеформированным состоянием и дальнейшая эволюция этих закономерностей ведет к снижению значений δ , ψ , КСЧ и КСТ при термическом упрочнении усиливая свое влияние при повышении температуры начала проведенияковки из-за роста β -зерен, толщины α -оторочки и длины α -пластин;

- показано, что проведение отжига горячедеформированных полуфабрикатов сплава ВТ23 в верхней части $(\alpha+\beta)$ - и β -области с выдержкой

в течение 1 ч может быть признано однозначно целесообразным в случаях использования этой операции как заключительной термической обработки, а в других случаях проведение таких отжигов может быть использовано только для решения частных задач упрочнения и при подборе для каждого случая нужного режима, в частности, увеличение времени нагрева в верхней части ($\alpha+\beta$)-области при проведении операции с целью изменения типа структуры, например, с колониального расположения α -пластин на хаотическое и ликвидация α -оторочки (880°C в течение 2 ч);

- на основе разработанной методики установлена целесообразность окончательной деформации крупногабаритных и других кованных полуфабрикатов из β -области: 1150–900 °C, $\varepsilon = 40\text{--}70\%$, охлаждение на воздухе, способствующей повышению однородности структуры по сечению, измельчению β -превращенного зерна, образованию внутризеренной морфологии с разориентированным (незакономерным) расположением α -пластин толщиной 0,5–2,5 мкм, не требующей проведения последеформационного отжига и обеспечивающей при последующем термическом упрочнении выигрыш в пластичности, трещиностойкости и малоциклового усталости по сравнению с ковкой с более низких или высоких температур;

- созданы научно-методические основы для решения задачи повышения уровня и однородности механических свойств крупногабаритных и фасонных заготовок и сварных изделий из ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов посредством новых способов проведения упрочняющей термической обработки;

- разработаны комбинированные способы охлаждения крупногабаритных заготовок типа «воздух-вода», «воздух-масло» и «масло-вода» при высокотемпературной термической обработке, когда естественному условию получения различных скоростей охлаждения по сечению как альтернатива введено создание искусственного различия начальных температур интенсивного охлаждения: более высокой скорости охлаждения соответствует более низкая температура начала собственно закалки, за счет чего достигается практически одинаковый эффект упрочнения во всех зонах после старения (1-й вариант воздействия);

- установлено, что для решения задачи повышения уровня механических свойств и достижения одинакового эффекта упрочнения по сечению крупногабаритных или фасонных заготовок альтернативой различной интенсивности охлаждения по сечению при закалке является введение два или более раз повторяющейся (в зависимости от типа структуры) операции кратковременного нагрева

состаренной заготовки в печи при температуре выше температуры предшествовавшего старения с самореализующимся эффектом обеспечения условий, когда значение конкретной температуры нагрева каждой из зон пропорционально скорости ее охлаждения при закалке, что и способствует равному эффекту упрочнения по сечениям полуфабриката (2-й вариант воздействия);

- наибольший эффект возможного повышения уровня и однородности механических свойств обеспечивает одновременное использование обоих упомянутых выше манипуляций при проведении упрочняющей термической обработки крупногабаритных и фасонных полуфабрикатов (сочетание 1-го и 2-го вариантов);

- рентгенографическим методом изучены фазовый состав и кристаллографическая текстура в катаных листах ($\alpha+\beta$)-титанового сплава ВТ23 после кратковременных нагревов в широком (700–1260 °C) диапазоне температур с последующим быстрым (на воздухе) охлаждением, имитирующих нагрев и охлаждение при сварке в околошовной зоне;

- выявлено, что кратковременные нагревы, включающие переход ($\alpha+\beta$) \leftrightarrow β , приводят к радикальным изменениям кристаллической текстуры низкотемпературной α -фазы, что позволило определить температуру полиморфного превращения ($t_{п.п.}$) сплава ВТ23, а при температурах нагрева, превышающих $t_{п.п.}$, выявили также текстурные изменения обеих фаз, вызываемые процессом рекристаллизации высокотемпературной β -фазы и установили температурные интервалы смены предпочтительных ориентировок β -фазы как во время низкотемпературной (ниже $t_{п.п.}$), так и высокотемпературной (выше $t_{п.п.}$) ее рекристаллизаций, что предопределяло в конечном итоге предпочтительные ориентации сформировавшейся после охлаждения низкотемпературной α -фазы и вполне определенный комплекс механических свойств сплава ВТ23, когда образцы, нагревавшиеся при 1000 °C и выше, из-за перегрева в β -области (на 80 °C и более выше $t_{п.п.}$) имели значительно более низкие значения механических свойств;

- рекомендовано в большинстве случаев термического упрочнения сварных изделий из ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов на уровне выше 1080 МПа производить без применения предварительных отжигов, так как образцы металла, нагревавшиеся до 1000 °C и выше и прошедшие затем отжиг, имели еще более низкие значения механических свойств по сравнению с упрочнением без отжига из-за дальнейшего огрубления перегретой структуры;

- рекомендовано при разработке режимов термического упрочнения на уровне $\sigma_B = 1080$ МПа

и $\sigma_B = 1180$ МПа изделий с наличием перегретой структуры (сварные соединения и другие случаи) избегать дальнейшего огрубления структуры за счет снижения температуры нагрева при высокотемпературной обработке и увеличение интенсивности охлаждения при закалке или уменьшения времени нагрева под закалку при повышенных температурах до минимума и снижения интенсивности охлаждения, а также посредством снижения температуры старения до 450°C ($t_{п.п.} = 470^\circ\text{C}$) и проведения после старения дополнительного (возможно неоднократного) кратковременного печного нагрева на $100\text{--}150^\circ\text{C}$ выше температуры старения, выдержка при этой температуре и ускоренное охлаждение.

Основные выводы по результатам исследований:

- расширены существующие представления о способах термической обработки и происходящих при этом закономерных структурных превращений в титановых сплавах с $(\alpha+\beta)$ -структурой посредством публикации более 50 научных статей и более 20 авторских свидетельств и патентов;

- предложены основные пути разработки новых режимов термической обработки и оптимизации ее технологии при изготовлении различных деталей из $(\alpha+\beta)$ -сплавов с повышенным комплексом механических свойств;

- выявлены закономерности распада высокотемпературной β -фазы в сплаве ВТ23 с пластинчатой структурой после нагрева в верхней части $(\alpha+\beta)$ -области в течение 2 ч и непрерывном после этого охлаждении с различной интенсивностью и влияние их на формирование структуры и свойств сразу после проведения высокотемпературной обработки и после дополнительного старения;

- установлены закономерности изменения механических свойств горячедеформированного сплава ВТ23 с различной исходной пластинчатой структурой за счет распада нестабильных фаз в результате варьирования технологических параметров при низком отжиге и старении и показано их применение на практике;

- обоснована целесообразность деформации из $(\alpha+\beta)$ - и β -области и проведения предварительных

отжигов для повышения уровня и однородности механических свойств при последующем термическом упрочнении крупногабаритных и фасонных поковок из сплава ВТ23;

- научно и методически обоснованы и проверены на практике пути и способы повышения уровня и однородности термического упрочнения различных изделий из сплава ВТ23 при одновременном улучшении других характеристик механических свойств за счет целенаправленного термического воздействия на конкретную исходную структуру;

- обобщены результаты упрочнения сплава ВТ23 в зависимости от типа пластинчатой структуры, дана характеристика наиболее желаемых типов такой структуры, предложены научно-методические обобщения по прогнозированию эффективности термического упрочнения титановых сплавов и оценке способности полуфабрикатов из этих сплавов к однородному термическому упрочнению, а также методическая схема установления верхнего предела их упрочнения;

- определены фактические значения σ_B , δ , ψ , КСЧ, КСТ и малоциклового усталости, а также механические свойства и длительная прочность при повышенных температурах эксплуатации для полуфабрикатов сплава ВТ23, имеющих широкий спектр строения структуры, тем самым показана возможность и открыт путь к получению этих полуфабрикатов в условиях промышленного производства и использования их при изготовлении несущих конструкций авиационной техники;

- открыта возможность внесения в технические условия на поставку полуфабрикатов конкретных требований по состоянию исходной структуры сплава ВТ23, ее преобразования посредством термической обработки для различных случаев их использования по фактическому назначению выбранной детали для конструкции;

- могут быть удовлетворены потребности отрасли в крупногабаритных деталях и сварных соединениях из сплава ВТ23 с высокими уровнями термического упрочения $\sigma_B = 1080$ МПа (110 кгс/мм²), $\sigma_B = 1130$ МПа (115 кгс/мм²) и $\sigma_B = 1180$ МПа (120 кгс/мм²) и стабильностью свойств ($\Delta\sigma_B$ не более $100\text{--}150$ МПа).