

## **МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Авиакосмическое машиностроение вследствие высоких требований, предъявляемых к летательным аппаратам, всегда являлось двигателем науки, техники и образования. Одним из направлений повышения тактико-технических характеристик летательных аппаратов является снижение их массы, повышение ресурса, надежности и технологичности благодаря применению титановых материалов, которые по удельной прочности, коррозионной стойкости, жаропрочности и демпфирующим свойствам превосходят все традиционные конструкционные материалы. Принято, что полезный груз, доставляемый в космос, составляет 2–3% от массы сжигаемого топлива. В 60-е гг. XX в. титан в полной мере определял стратегическую обороноспособность страны, так как масса определяла дальность и высоту полета самолета, не достигаемую средствами ПВО. Примером применения титана является самолет F12: 90% титана. Создание мощной научно-технической базы титановой металлообработки обеспечило высокий оборонный потенциал СССР. Первый отечественный титановый материал был изготовлен в ВИАМ для первой баллистической ракеты. 50 лет назад – это дата рождения отечественной металлообработки титана. В этот период разработаны различные группы титановых сплавов широкого назначения, в том числе высокопрочные титановые ( $\alpha+\beta$ )-сплавы: ВТ16, ВТ22, ВТ3-1 и ВТ23, которые широко применяются в авиакосмической технике. После создания сплава ВТ22, который обладает высокой технологической пластичностью и высокой прокаливаемостью при термической упрочняющей обработке, в отделе термической обработки НИАТ, обслуживающем машиностроительные предприятия авиационной техники, совместно с ВИАМ разработаны уникальные технологии и оборудование арговакуумной термообработки крупногабаритных деталей и сварных узлов из этого сплава, включая шасси самолета. Наиболее перспективным представляется сплав ВТ16, химический состав которого обеспечивает высокую технологическую пластичность, необходимую для специализированного производства заготовок на холодноформовочных автоматах, и пониженную чувствительность деталей к концентраторам напряжения в термоупрочненном состоянии. Однако по объективным и субъективным причинам были потеряны перспективные темпы развития потенциальных возможностей высокопрочных титановых сплавов. При потенциальной прочности 1600–1800 МПа, при практическом их применении реализуется прочность 1050 МПа.

В 1988 г., по результатам международной конференции по титану, в Авиапроме был сделан вывод (Отчет «О результатах командирования ученых и специалистов за границу по линии международных научно-технических связей» 6.04.1988 г., ДСП), что отечественная промышленность не имеет перспективной концепции специализированного титанового производства ни по технологии и оборудованию, ни по контролю и организации производства, ни, в итоге, по качеству, надежности и технологичности производства деталей ответственного назначения, работающих в условиях знакопеременных динамических нагрузок, – таких как, например, броня, болты, пружины, лопатки и диски газотурбинных двигателей. В частности, оборудование сортопрокатного производства титана находится на уровне 40-х гг. XX в. и не обеспечивает высокого качества титанового материала.

---

\* ОАО «НИАТ».

Проблемы ресурса, надежности и технологичности производства ответственных деталей связаны с разработкой способов изготовления чистых, химически однородных слитков, заготовок и деталей с гомогенной равноосной супермелкозернистой структурой и высококачественной поверхностью, отвечающих самым высоким требованиям по усталостной прочности и вязкости разрушения, изготавливаемых прогрессивными способами холодного формообразования на автоматических линиях специализированного производства. Однако в процессе нагрева титана при традиционной термической и термомеханической обработке происходит окисление, газонасыщение и катастрофический рост зерна, которые резко снижают усталостную прочность и вязкость разрушения материала. По склонности к росту зерна титановые сплавы превосходят наследственно крупнозернистые стали. Попытки создать прогрессивное оборудование для термической обработки не дали положительного результата. Не оправдали ожидания и 18 высокотемпературных вакуумных электропечей, изготовленных, по техническому заданию НИАТ, японской фирмой «Ulvac». Проблема специализированного производства высокоресурсных титановых деталей и узлов постоянно рассматривалась на коллегиях МАП. Особенно остро встал вопрос бронирования вертолетов и средств индивидуальной защиты войск во время Афганской войны.

Одним из перспективных направлений термической обработки, с целью сокращения времени взаимодействия титанового материала со средой нагрева и предотвращения роста зерна, представлялся быстрый электротермический нагрев. Электротермический нагрев под деформацию титана широко применяется в сортопрокатном производстве заготовок. Титан по полиморфизму и температурам обработки напоминает железо, но, несмотря на, казалось, достаточную изученность закономерностей кинетики фазовой перекристаллизации стали, они не проявлялись в полной мере при обработке титана и не обеспечивали получения материала с мелкозернистой структурой. В НИАТ велись широкие исследования использования быстрого нагрева под упрочняющую термообработку высокопрочных титановых сплавов. Была разработана уникальная технология непрерывного индукционного нагрева под раскатку титановых валов авиационных двигателей, и был опыт в разработке и внедрении технологии и оборудования индукционной термообработки стальных лопастей вертолетов и деталей брони индивидуальной защиты пилота.

Необходимо отметить – и это касается непосредственно титана, – что настоящее историческое время России можно рассматривать как юбилейный период – 150-летие рождения Металловедения как науки о закономерностях структурообразования в металлах, связанной с именами великих русских металлургов П.П. Аносова (1799–1851 гг.) и Д.К. Чернова (1839–1921 гг.). В 1831 г. П.П. Аносов впервые применил микроскоп для исследования структуры металлов. Ему принадлежит приоритет в создании легированных сплавов, он разработал технологию и изготовил клинки булатной стали. Д.К. Чернов, техник молотового цеха Обуховского сталелитейного завода, исследуя причины брака поковок для стальных орудий, изучая строение изломов в месте разрыва, пришел к выводу, что сталь тем прочнее, чем мельче зернистость излома. Он «стал искать причину приобретения сталью мелкой структуры». В 1868 г. он сделал сообщение, что «приобретение сталью мелкой структуры... нужно отнести к влиянию температуры, но не собственно к механической обработке» и что еле заметные поверхностные изменения, обнаруживаемые в темноте на охлаждающейся раскаленной поковке при двух температурах, связаны с глубокими внутренними превращениями в стали, сопровождающимися тепловыми эффектами. Эти температуры Д.К. Чернов определил на глаз и обозначил точками *a* и *b*. Графическая зависимость температуры этих превращений и плавления стали от содержания углерода, которая была найдена Д.К. Черновым по цветам каления, явилась прототипом равновесной диаграммы состояния Fe–C. Позднее, с

изобретением термопары, температуры этих точек были определены французским ученым, последователем Д.К. Чернова, Ф. Осмондом при построении диаграммы Fe–C и обозначены им  $A_1$  и  $A_3$  как критические температуры превращения феррита и перлита в аустенит, соответствующие точкам Чернова  $a$  и  $b$ . Таким образом, великий металлург, всемирно признанный отцом металловедения, заложил научные основы термической обработки металлов. Однако гениальность выводов Чернова, заключающаяся в том, что измельчение зерна стали не связано с собственно деформацией, не была осознана в полной мере не только современниками, но и в настоящее время. Еще при жизни Чернова возникла дискуссия и попытка ревизии расположения точек  $a$  и  $b$  относительно  $A_1$  и  $A_3$ , применительно к измельчению зерна стали, но особенно актуальной эта проблема стала вследствие применения быстрого непрерывного электротермического нагрева. Эта проблема связана с идеями о равновесии фаз в структуре металла, появившимися позднее, после работ Гиббса. Наиболее фундаментальные исследования в этой области велись в МИСиС Н.И. Кидиным, а также В.Д. Садовским и научными школами В.Н. Гриднева и М.Н. Бодяко. По существующей «классической» (Чернова) теории измельчение зерна связано непосредственно с полиморфным превращением, т. е. с образованием зародышей и ростом новых зерен, при этом чем больше скорость изменения температуры, тем больше число зародышей новой фазы и тем мельче зерно фазовой перекристаллизации. По другой теории, измельчение зерна не связано непосредственно с полиморфным превращением, т. е. с точками  $a$  и  $b$  Чернова, а является следствием фазового наклепа аустенита при аллотропическом превращении и рекристаллизационных процессах уже после завершения полиморфного превращения. Этот альтернативный взгляд на измельчение зерна имеет место и сейчас. В подтверждение этого считают, что расчетная величина внутренних напряжений, возникающих в титане при фазовом превращении, в 13 раз меньше, чем в железе, что и является препятствием измельчения его зерна. В связи с этим, с целью получения однородной мелкозернистой структуры, в технологии титана возникло энергоемкое и трудоемкое направление упрочняющего рекристаллизационного вакуумного отжига (газостатирования) точных заготовок, например дисков авиационных двигателей, из жаропрочных титановых сплавов после предварительной деформации, совмещенной с ТМО. Однако отсутствие однозначных положительных практических результатов при использовании этих технологий и противоречивость исследований авторы связывают с наложением температур рекристаллизации и фазовой перекристаллизации, осложненным многофазностью исходной структуры ( $\alpha+\beta$ )-сплава после ТМО, что говорит в пользу классической теории Чернова – теории измельчения зерна. Качество металла, т. е. такие параметры, как однородность и стабильность его структуры и, соответственно, высокая и стабильная усталостная прочность и вязкость разрушения по всему объему штамповки, зависит от степени и скорости деформации и температуры, при этом температура рассматривается как функция деформации, позволяющая посредством фазовой перекристаллизации в условиях ТМО сформировать равноосную мелкозернистую структуру высокопрочного и жаропрочного титанового материала.

В Национальном институте авиационных технологий (НИАТ) был проведен глубокий анализ и широкий комплекс фундаментальных исследований фазовой перекристаллизации металлов и сплавов [1–6]. Были обнаружены новые физические критерии механизма фазового перехода при аллотропическом превращении. В качестве основного вывода была сформулирована концепция концентрационной неоднородности твердых растворов фаз, объясняющая физическую сущность кинетики фазовой перекристаллизации металлов и сплавов и позволяющая реализовать ее особенности при скоростном нагреве в формировании супермелкозернистой структуры титанового сплава, упрочненного высокодисперсной фазой. В основе этой концепции – положение о кристаллографическом градиенте концентраций вторых компонентов и собственных дефектов атомного строения по кристаллографическим направлениям твердого раство-

ра фаз. Такой градиент контролирует кристаллографическое направление и объем фазовой перекристаллизации в зависимости не только и не столько от абсолютного значения изменившегося термодинамического параметра ( $p$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $c$ ) твердого раствора, например температуры, сколько от скорости ее (температуры) изменения, что позволяет с помощью концентрированных источников энергии эффективно управлять структурообразованием металлов и формировать структуру титанового сплава со строго регламентированным уровнем физических, механических, технологических и служебных свойств, недостижимых при использовании традиционных способов обработки титана. В рамках этих исследований нужно отметить выдающуюся научную роль Н.И. Кидина, который в фундаментальном труде «Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов» впервые сделал исключительно важные выводы о том, что быстрый нагрев позволяет управлять кинетикой фазовых превращений и создавать особые концентрационные состояния высокотемпературной фазы стали и таким образом конструировать структуру сплава, существенно улучшая комплекс его механических свойств. Он показал, что при НТМО с использованием скоростного нагрева возможна фрагментация внутризеренного строения, в частности фрагментация блоков аустенита, и что скоростной нагрев при ТМО, и особенно при НТМО, позволяет снизить степень деформации с 75–90 до 30–40% и осуществить эффективную проработку структуры. Именно в этом скрыто гениальное прозрение Чернова, что не собственно деформация измельчает структуру, а температура, – деформация при этом является всего-навсего источником скоростного нагрева. Нужно также отметить важный для понимания физической сущности «неравновесной» фазовой перекристаллизации вклад крупных ученых кафедры «Металловедение редких и цветных металлов» МИСиС – заведующего кафедрой И.И. Новикова, И.Л. Федотова и В.К. Портного – в исследования формирования ультрамелкого зерна в двухфазных титановых сплавах, и особенно работу И.И. Новикова и К.М. Розина «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки», в которой рассматривается роль собственных дефектов упаковки атомов на кристаллографическую анизотропию термодинамической системы строения атомного конгломерата, проявляющуюся в неравновесной кинетике аллотропического превращения при скоростном нагреве.

В результате этих исследований в 1980–1991 гг. в авиационном научно-производственном комплексе, при непосредственном участии ВИАМ, ВИЛС, ВСМПО, НИИСУ, ОАО «Ил», ОАО «Туполев», ЦАГИ, ГК НИИ ВВС, ППО «Моторостроитель», ВАПО, ГПО «Нормаль», КПО «Прогресс», БЛМЗ, НИИ СТАЛЬ, других предприятий и академических институтов, было разработано и утверждено министром авиационной промышленности принципиально новое направление специализированного производства точных прогрессивных титановых заготовок высокоресурсных деталей летательных аппаратов, обеспечивающее:

- снижение массы летательных аппаратов;
- повышение ресурса и надежности ответственных узлов самолета в 2 раза;
- снижение трудоемкости и энергоемкости на 60–80% и повышение производительности титановой металлообработки в 20–30 раз;
- повышение коэффициента использования дорогостоящего металла (КИМ) с 0,1 до 0,9;
- сокращение основных фондов и средств производства;
- унификацию титановых сплавов;
- сертификацию технологических процессов;
- организацию специализированного производства широкой номенклатуры высокоресурсных титановых заготовок, деталей и узлов непосредственно для сборки авиакосмической и другой машиностроительной техники.

Научно-техническая новизна нового направления титановой металлообработки определяется разработкой принципиально новых технологических параметров скоростной электротермической и электротермомеханической обработки (СЭТО и СЭТМО)

высокопрочных титановых сплавов на стыке металлургического сортопрокатного производства и термической обработки калиброванных обточенных и шлифованных прутков, проволоки, листов и других профилей с мелкозернистой структурой и регламентированным уровнем механических, технологических и служебных свойств, обеспечивающих изготовление точных заготовок прогрессивными способами холодного формообразования (штамповкой, высадкой, вытяжкой, раскаткой, навивкой и прессованием) на автоматизированных линиях специализированного производства и упраздняющих традиционную упрочняющую термическую обработку титановых деталей как таковую. Новое перспективное направление было реализовано в серийных и специализированных условиях производства деталей и узлов авиационной техники.

– Впервые разработана технология специализированного производства высокоресурсных деталей из высокопрочных титановых сплавов на автоматических линиях специализированного производства способами холодного формообразования: штамповки, высадки, редуцирования, вальцевания, вытяжки, накатки и раскатки.

– Впервые в мировой практике разработана технология изготовления броневых материалов АБОТИ-82 из сплава ВТ23, который успешно прошел государственные испытания по методике ГК НИИ ВВС обстрелом броневой и фугасными снарядами калибра 7,62; 12,7 и 30 мм. По результатам государственных испытаний, материал АБОТИ-82 обладает преимуществом в массе (до 32%) в сравнении с серийной стальной броней К.В.К.-37ВД. В 1985 г. технология АБОТИ-82 была внедрена в серийном производстве бронезилетов, применявшихся в боевых условиях Афганистана.

– Проведенные сравнительные испытания, по программе главного конструктора Ил-96 и ЦАГИ, болтов, изготовленных по новой технологии, в образцах узлов крепления нижних панелей крыла показали ресурс более чем в 2 раза выше, чем у образцов узлов с серийными стальными болтами. Титановые болты были рекомендованы к применению в авиационной технике; изготовлено несколько комплектов болтов для Ил-96-300.

– Впервые в мировой практике разработана и внедрена технология (ММЗ им. С.В. Ильюшина, АНТК им. А.Н. Туполева, ВАСО, КПО «Прогресс») изготовления титановых навивных пружин. По техническому обоснованию НТЦ ВАЗ были изготовлены пружины подвесок автомобилей ВАЗ и Ferrari с рабочей нагрузкой до 3 тс на пружину, а также пружины клапанов газораспределения двигателей.

Научный уровень работ отмечен Государственной Премией СССР, результаты работ докладывались на отечественных и международных конференциях, опубликованы в печати. Имеется вся необходимая научно-техническая и технологическая документация, которая защищена патентами. Новое перспективное направление специализированного производства высокоресурсных титановых деталей выводит отечественную титановую металлообработку из заготовительного металлургического производства на рынок широкой номенклатуры деталей машиностроительной техники. Иностранные авиационные и автомобильные фирмы, в частности «Ferrari» и «Boeing», обращались с предложениями об организации производства пружин и крепежа в России. Потребность в этой продукции оценивается в 100000 т.

В условиях отсутствия в России разработанных титановых месторождений, которые остались в СНГ, отсутствия перспективного Единого Директивного Технологического Процесса (ЕДТП) титановой металлообработки, а также в связи с созданием Авиахолдинга, целью которого является к 2015 г. достижение ведущих позиций на мировом рынке самолетостроения (что не может состояться без высокоразвитой титановой металлообработки), представляется необходимой разработка Федеральной Целевой Программы (ФЦП). Программой предполагается организация Научно-производственного Центра «Авиатитан», основной целью которого будет разработка ЕДТП и органи-

зация специализированного производства и рынка широкой номенклатуры высокоресурсной титановой продукции непосредственно на сборку авиационной и другой машиностроительной техники. Это касается производства титановых концентратов, губки и слитков, при этом проблемные вопросы будут решаться в едином блоке. Опытом в реализации качества титанового материала в наибольшей степени владеют ВИЛС и корпорация ВСМПО-Ависма, успешно работающая на мировом рынке сырьевой переработки. Главным в ЕДТП является сортопрокатное производство заготовок, – это самое слабое звено, и именно там сосредоточены новые перспективные технологии, которые требуют замены основных средств производства с полной технологической инфраструктурой. Особая роль отводится ВИАМ в части разработки и унификации перспективных высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов применительно к новым титановым технологиям. Исключительно важное внимание будет уделено подготовке перспективных кадров. В качестве организационной структуры титановой металлообработки, ФЦП предлагает создание Федерального Специализированного Холдинга титановой металлообработки. Проект ФЦП проходит организационно-техническую экспертизу на уровне администрации Президента РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баулин А.В., Смирнов А.М. Особенности фазовой перекристаллизации титана и его сплавов при скоростном нагреве //МиТОМ, 1993, №2, с. 33–36.
2. Ивасишин О.В., Баулин А.В. Оптимизация технологических режимов скоростного нагрева под закалку деталей из титановых сплавов //Авиационная промышленность, 1986, №7, с. 56–59.
3. Баулин А.В., Смирнов А.М. Фазовые превращения в условиях скоростного нагрева титановых ( $\alpha+\beta$ )-сплавов и их влияние на механические свойства //МиТОМ, 1987, №1, с. 62–64.
4. Баулин А.В., Третьяков В.П. Горячая высадка крепежа из упрочненного прутка сплава ВТ16 //Авиационная промышленность, 1988, № 12.
5. Баулин А.В. Перспективное направление специализированного производства точных заготовок высокоресурсных деталей и узлов //Авиационная промышленность, 1996, № 5–6, с. 43–48.
6. Баулин А.В. Технология упрочнения титановых заготовок деталей летательных аппаратов с использованием скоростных методов нагрева: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук.– М.: НИАТ, 1991.