

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ**

Р. Х. САЙДАХМЕДОВ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

ТАШКЕНТ 2005

Сайдахмедов Р. Х. Прогрессивные технологии производства конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов: Учеб. пособие - Ташкент: Изд-во ТГАИ, 2005. - 54 с.: ил.

Описаны прогрессивные технологии производства титановых самолетных деталей. Отражены особенности обработки титановых деталей, рассмотрены конструкционные и технологические свойства титановых сплавов, описаны технологические процессы, оборудование и оснастка, применяемые при производстве самолетов. Особое внимание обращено на новые перспективные технологические способы изготовления самолетных деталей.

Учебное пособие предназначено для студентов магистратуры, по авиационным специальностям, специалистов заводов, КБ и НИИ отрасли, может быть также полезно и для аспирантов вузов.

Табл.-10, ил.-7, библиогр. – 24 назв.

Рецензенты:

Доцент кафедры «Автомобилестроение и современные технологии»
ТАДИ к.т.н. Таджиев А.Т.

Доцент кафедры «Технология производства летательных аппаратов»
ТГАИ к.т.н. Акбаров М.М.

© Ташкентский государственный авиационный институт, 2005

Утверждено методическим советом ТГАИ 9 июня 2005 г .

Сайдахмедов Равшан Халходжаевич

Прогрессивные технологии производства конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 3,5. Тираж 50.

Типография ТГАИ

ул. Шахрисабз, 25

Ташкент, 700047

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы все большее применение в конструкциях летательных аппаратов находят титановые сплавы, так как они обладают значительно большей удельной прочностью по сравнению со сталями, а при рабочих температурах выше 150°С - и по сравнению с алюминиевыми сплавами. Титановые сплавы незаменимы для конструкций сверхзвуковых самолетов. Однако титановые сплавы менее технологичны по сравнению со сталями и алюминиевыми сплавами, (плохо обрабатываются резанием, под давлением, плохо свариваются), что препятствует их более широкому применению в авиации. Тем не менее в НИИ ОКБ объем применения титановых сплавов в конструкциях ЛА растет. На отдельных предприятиях, в научно-исследовательских институтах, опытно-конструкторских бюро накоплен достаточный опыт изготовления титановых конструкций. Целью книги является ознакомление специалистов, студентов, аспирантов с последними достижениями в области изготовления конструкций из титановых сплавов.

В настоящей книге описана технология производства титановых деталей. Пионерами в промышленном освоении титановых сплавов в самолетостроении были ОКБ им. А.Н. Туполева, А.И. Микояна, П.О. Сухого. Большая заслуга в этом отношении принадлежит генеральным конструкторам А.Н. Туполеву, А.И. Микояну, М.И. Гуревичу, П.О. Сухому, А.А. Туполеву, Р.А. Белякову, М.П. Симонову и др. Значительный вклад в металлургию и металловедение титана, технологию создания авиационных конструкций из титана внесли Н.П. Сажин, В.А. Ливанов, А.Ф. Белов, С.Г. Глазунов, В.И. Добаткин, Н.Ф. Аношкин, И.И. Корнилов, С.А. Вигдорчик, В.В. Тетюхин, Г.Л. Ходоровский, К.К. Ясинский, Б.Е. Патон, С.М. Гуревич. Промышленное освоение титановых деталей и конструкций осуществлялось и на Ташкентском авиационном производственном объединении им. В.П. Чкалова. В частности многие детали самолёта ИЛ-76 и ИЛ-114 изготовлены из титановых сплавов, освоена технология их обработки. Например, впервые на ТАПОиЧе разработана технология изготовления стойки шасси самолета Ил-76 из титанового сплава.

Автор надеется, что изложенные в книге материалы помогут студентам бакалавриатуры, магистратуры, аспирантам, научным работникам, а также специалистам занимающимся применением титановых сплавов в авиастроении в своей дальнейшей деятельности.

Автор приносит глубокую благодарность доц. Таджиеву А.Т. и доц. Акбарову М.М. за рецензирование данной работы.

Автор с признательностью примет замечания читателей по содержанию книги.

ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ

Титан впервые открыт в виде диоксида в 1791 г. англичанином Грегором. Белый оксид неизвестного металла был назван менакканум. В 1795г. немецкий химик Клапорт, проанализировав красные пески в Венгрии, обнаружил в них металл, который назвал титаном. В последствие (1797 г.) Клапорт установил, что неизвестный металл из черных песков Англии, из красных песков Венгрии и коричневых минералов Испании представляет один и тот же новый химический элемент, получивший название титан. Титан долгое время не находил практического применения из-за его хрупкости. Полученный в 1925 г. Ван Аркелем и де Буром иодидным методом (очистка титана иодом) чистейший титан оказался пластичным и технологичным металлом со многими ценными свойствами, которые привлекли к нему внимание широкого круга конструкторов и инженеров. В 1940 г. Кролль предложил магниетермический способ извлечения титана из руд, который является основным и в настоящее время. Первая промышленная партия титана массой 2 т была получена в 1948 г., и этот год считается началом практического применения титана.

Мировое производство титана (без СССР) составило 2100 т в 1953 г., 22000 т в 1966 г., 55000 в 1981 г. и примерно 44000 т в 1988 г., 66000 т в 1996 г.

Производство титана в СССР началось в 1950 г. и нарастало довольно быстро. В 1960-1990 г. в СССР было создано крупнейшее в мире производство титана и его сплавов. В конце 1980-х годов объем промышленного производства титана в СССР превышал объем его производства во всех остальных странах мира вместе взятых. С 1990 г. производство титана в СССР начало сокращаться и в 1993 г. общий выпуск титановой губки составил немногим более 30% выпуска 1989 г. Следует отметить, что в этот период происходило существенное снижение объема производства слитков и проката в США и Японии. Снижение объема выпуска титана в бывшем СССР связано спадом производства в авиационной отрасли. Вместе с тем нет сомнений в том, что этот спад производства носит временный характер, поскольку титан и его сплавы по многим показателям превосходят другие материалы. Так, например ТАПОиЧ в 2004 г. выпустило 12 самолетов. Это существенный прирост производства самолетов по сравнению с предыдущими годами.

Титановые сплавы применяются для изготовления сварных узлов и штампованных деталей, работающих при температуре 300-500°С, обшивок (ОТ4-1, ВТ5, ВТ20), силовых деталей каркаса планера, деталей шасси (ВТ-22), тяг, качалок основной системы управления и системы управления двигателями. В изделии ИЛ-76 из сплава ВТ22 изготавливают монорельсы, каретки закрылков, детали стоек шасси, силовые высоконагруженные кронштейны во всех системах и конструкциях самолета оси крепления кулачков микропереключателей на центральном пульте летчиков, в качестве усиливающих вставок в лонжеронах крыла, различных элементов жесткости – осей, вставок и тому подобных элементов.

Сплавы ОТ4, ВТ5, ВТ20 применяются преимущественно в виде листов, относятся к свариваемым сплавам. Они применяются для обшивки элеронов, предкрылков, носков крыла и оперения, в воздухозаборных каналах ВМТ (воздухозаборники масляного тракта) и выхлопных каналах мотогондол изделия ИЛ-114 и ИЛ-114-100. Сплавы ВТ5, ВТ6, ВТ16 - повышенной прочности, используются для объемной штамповки.

Титановый сплав ВТ19 используют для изготовления крепежных элементов- болтов, винтов, заклепок, используемых в местах соединения ответственных узлов и работающих в тяжелых условиях.

Особенно выгодным становится применение титановых сплавов в качестве обшивки на сверхзвуковых самолетах, так как использование там алюминиевых сплавов невозможно из-за высокого нагрева обшивки при сверхзвуковом полете в результате трения о воздух.

Титан обладает малой плотностью, большой удельной прочностью, необычайно высокой коррозионной стойкостью, значительной прочностью при повышенных температурах. Титан - ценный материал в ракетостроении и авиации, где выигрыш в массе играет доминирующую роль. Применение титановых сплавов в авиационной и ракетной технике наиболее целесообразно в интервале температур 250...600°С, когда легкие алюминиевые и магниевые сплавы уже не могут работать, а стали и никелевые сплавы уступают по удельной прочности.

В связи с ужесточением требований к повышению эффективности самолетов изменяются требования к ресурсу и массе конструкции планера. Изменение требований к экономичности самолетов привело к общей тенденции в мировом самолетостроении по увеличению ресурса проектируемых самолетов до 40 000 - 60 000 ч полета с одновременным неуклонным снижением массы конструкции планера, которая теперь приближается к 26—28 % от взлетной массы самолета.

Основные направления обеспечения требуемого ресурса и снижения массы конструкции планера состоят в следующем: применении крупногабаритных полуфабрикатов с высоким сопротивлением усталости материалов; использовании высокоресурсных соединений с высокой массовой эффективностью; разработке технологии создания конструкции, обеспечивающей сохранение или минимальное снижение служебных свойств исходных материалов.

Наиболее перспективными сплавами для силовых конструкций планера современного самолета являются титановые сплавы, обладающие более высокими характеристиками удельной прочности по сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями, высокой коррозионной стойкостью и достаточным сопротивлением усталости и отличающиеся возможностью эффективного использования в условиях повышенных температур, при которых применение алюминиевых сплавов невозможно или нецелесообразно.

С учетом конструктивных особенностей силовых элементов конструкции планера (панелей, поясов, стенок, шпангоутов, балок, узлов, шасси и др.) для их изготовления требуются полуфабрикаты в виде плит, штамповок (поковок), литья, а также пресованных и катаных профилей, листов.

Проектирование усталостно-опасных элементов конструкций данного типа предъявляет к материалу требования высокой удельной прочности и пластичности при обеспечении наибольшей вязкости разрушения и наименьшей скорости распространения трещин. Для титановых сплавов удовлетворить эти требования можно с помощью создания необходимой структуры, обеспечиваемой различными схемами деформации и термической обработкой для различных полуфабрикатов, а также построением технологии изготовления деталей и узлов из титановых сплавов с учетом всех его специфических особенностей.

Массовая эффективность конструкции является одним из главных показателей её качества. Существенную роль в повышении массовой эффективности конструкции играет совершенство полуфабрикатов и выбор вида соединения конструктивных элементов, который часто определяется не только конструктивными задачами, но и технологическими возможностями материала конструкции. Из анализа равно-ресурсных конструкций стыка двух панелей следует, что наилучшей массовой эффективностью обладают сварные соединения, причем электронно-лучевая сварка (ЭЛС) дает значительные преимущества перед другими видами сварки. Поэтому одно из основных требований к выбору титановых сплавов для авиационных конструкций - их хорошая свариваемость.

При выборе материалов для планера самолета приходится учитывать многие факторы, определяющие надежность, безопасность, экономичность авиационной техники, а также летно-тактические характеристики. Основные факторы, которые нужно учитывать при выборе материалов для планера самолета, и характеристики материалов, соответствующие этим факторам, приведены в табл. 1.

Выбор материала для авиационных конструкций базируется на пределах прочности, текучести, сопротивлении конструкции усталости (концепции циклического напряжения и циклической деформации). В настоящее время этот подход к выбору материалов дополнен требованиями линейной механики разрушения с учетом вязкости разрушения и скорости роста усталостной трещины.

Перед проектированием самолета L-1011 фирмой "Локхид" авиационные компании оценили природу конструктивных недостатков, встречающихся при эксплуатации предыдущих транспортных самолетов. По единодушному мнению всех компаний, основные недостатки предыдущих самолётов были связаны с двумя явлениями: недостаточной усталостной выносливостью и коррозией.

Иногда полагают, что основное препятствие, сдерживающее более широкое применение титановых сплавов в самолётостроении, состоит в высокой стоимости исходного титана. В действительности этот фактор имеет второстепенное значение. Стоимость сырьевых материалов в истребителе из алюминиевых сплавов составляет всего 1% от стоимости машины. Если истребитель изготовить полностью из титановых сплавов, то стоимость сырьевых материалов составит 3,5%. Если стоимость титана понизилась бы наполовину, то стоимость истребителя уменьшилась бы всего на 1%. Таким образом, стоимость машины

определяется в основном не стоимостью сырьевых материалов, а затратами на производство.

Таблица 1.

Характеристики материалов, обеспечивающие выполнение основных требований самолетостроения

Требования	Характеристика материала
Нагрузка	Прочность
Вибрация	Усталость, фреттинг, истирание
Температура	Ползучесть, длительная прочность, окисление, коррозия, тепловое расширение, теплопроводность
Окружающая среда	Общая коррозия, коррозия под напряжением, давление пара
Масса	Плотность
Жесткость	Модуль упругости, пластичность
Стабильность	Все характеристики
Безопасность	Удлинение, вязкость, однородность свойств, надежность
Экономичность	Стоимость материалов, производства, технического обслуживания; сроки эксплуатации

Процесс изготовления деталей и элементов конструкции из титановых сплавов более трудоемкий, чем из алюминиевых, в силу присущих титану технологических свойств. Высокая стоимость титановых деталей и конструкции обусловлена следующими факторами:

1) активным взаимодействием титана с газами при повышенных и высоких температурах, что приводит к необходимости защиты металла от этого взаимодействия при технологических процессах и применения в ряде случаев вакуумного отжига;

2) недостаточной технологичностью при обработке давлением, что приводит к повышению трудоемкости производства деформированных полуфабрикатов и снижению коэффициента использования металла (КИМ) (для титановых сплавов КИМ часто равен 0,10-0,20);

3) малой производительностью механической обработки (примерно 15% от производительности механической обработки алюминиевых сплавов);

4) высокой чувствительностью механических свойств титановых сплавов к типу и параметрам микроструктуры, что предъявляет строго регламентированные требования к технологическим параметрам для получения благоприятной структуры.

Таким образом, снижение стоимости титановых самолетных конструкций должно быть основано не только на уменьшении стоимости исходного титана, но и на совершенствовании технологии изготовления из них конструкций.

Титановые сплавы в самолетных конструкциях применяют:

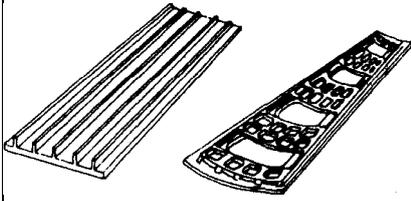
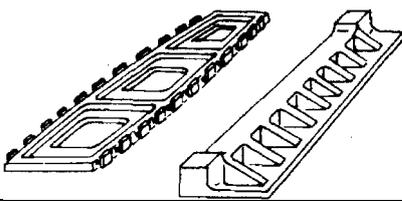
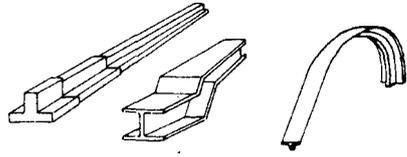
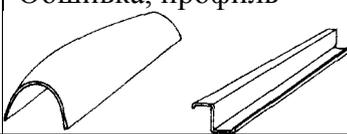
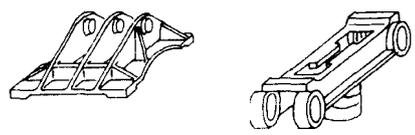
а) как материалы, обладающие более высокими удельными характеристиками, по сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями в обычных околозвуковых самолетах;

б) как материалы, для сверхзвуковых самолетов, если алюминиевые сплавы становятся неработоспособными, а стали не могут конкурировать с титановыми сплавами из-за меньших удельных прочностных характеристик.

Классификация силовых элементов конструкции и используемых для их изготовления полуфабрикатов представлена в табл. 2. Там же указаны относительные объемы применения различных полуфабрикатов.

Таблица 2

Вид полуфабрикатов и объем их применения для типовых силовых элементов конструкции Л.А.

Вид полуфабриката	Объем применения	Типовые силовые элементы
Плиты	70-80%	 Панели
Штамповки	10-12%	 Нервюра, фитинг
Прессованные профили	5-7%	 Пояс, бимс, шпангоут
Прутки	3-5%	 Крепеж, арматура
Листы	5-8%	 Обшивка, профиль
Отливки	2-3%	 Корпус, кронштейн

В бывшем СССР промышленное производство титана и его сплавов было начато в 1950—1955 гг. На изделиях самолета марки «Ту» начало применения титановых полуфабрикатов в конструкции самолетов относится к 1960-м годам.

Общая масса титановых полуфабрикатов и деталей из них в самолетах, выпускаемых в 1970 и 1980-х годах, выросло примерно в два раза, по сравнению 1960-м годом. Значительно увеличилось применение штамповок и плит, в то же время существенно уменьшилось использование отливок и листов. Появились новые виды титановых полуфабрикатов, такие, как фольга - для сотовых конструкций, крупногабаритные горячекатаные профили - для силовых элементов крыла.

На фирме А.Н. Туполева плиты, профили, штамповки и поковки были впервые применены в изделиях выпуска 1960-х. (рис. 1).

Применение титановых сплавов в конструкции самолетов постоянно увеличивалось. Они стали неотъемлемым конструкционным материалом на современных самолетах Ту-204, Ил-114, Ил-76, Ил 96-300 (рис. 2).

В 1958 г. в конструкции самолета "Боинг-777" было применено менее

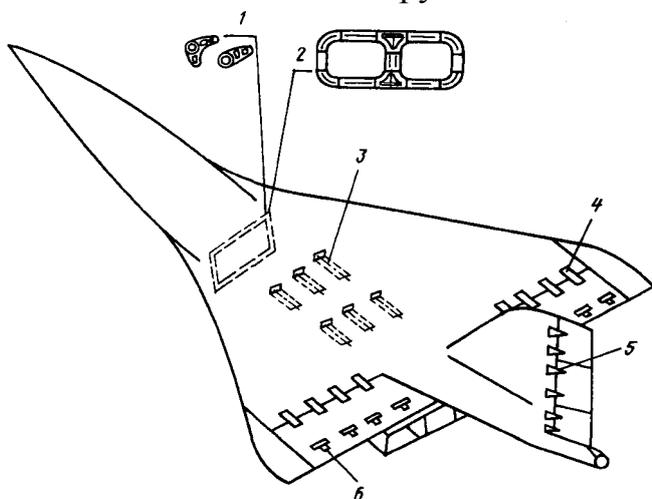


Рис. 1. Схема размещения деталей из титановых штамповок (поковок) в конструкции самолетов типа Ту, выпускаемых в 1960-е годы: 1 — кронштейны управления воздухозаборником (сплав ВТ22); 2 - шпангоут воздухозаборника (сплав ОТ4); 3 - силовые кронштейны СЧК (сплав ВТ20); 4 - кронштейны навески элевонеров (сплав ВТ20); 5 - кронштейны навески руля направления (сплав ОТ4); 6 - хвостовики неэвюп.

0,5% титановых сплавов от массы пустого самолета, а в "Боинге-777", построенном в 1995 г., масса титановых сплавов составила 8,5%. Ожидается, что применение титановых сплавов и впредь будет возрастать не только в конструкци-

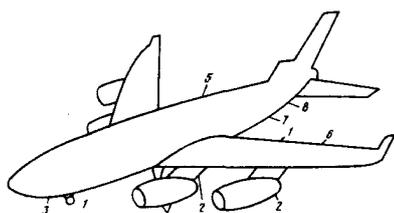


Рис. 2. Применение титановых сплавов в конструкции самолета Ил 96-300 (общая масса заготовок — 14300 кг; общая масса деталей — 5438 кг): 1 — шасси; 2 — детали гондолы двигателя; 3 — детали отсека шасси; 4 — сварные воздухозаборники; 5 — листовые детали планера; 6 — проволока для сварных соединений и заклепок; 7 — детали планера, изготовленные из поковок (штамповок); 8 — крепежные детали, полученные из прутков; 9 — цельнотянутые трубы гидравлической системы.

ях сверхзвуковых самолетов, но и крупных самолетов гражданской авиации. Удлинение профилей и лонжеронов по мере увеличения габаритных размеров самолетов требует жесткости, которая находится за пределами возможностей алюминиевых сплавов. Титановые сплавы превосходят по модулю упругости на 50—80 % алюминиевые сплавы и, обладая более высокой коррозионной стойкостью, удельными характеристиками прочности и сопротивления усталости, представляют собой оптимальный материал для конструкции планера крупногабаритных самолетов.

При оценке перспективности применения титановых сплавов в авиационных конструкциях следует также учесть, что их механические и эксплуатационные свойства непрерывно повышаются благодаря, усилиям металлургов, металловедов и технологов.

Естественно, титановые сплавы никогда не будут единственным конструкционным материалом самолетостроения. Несомненно, что при изготовлении деталей летательных аппаратов доля алюминиевых сплавов и особенно сталей будет постепенно снижаться. По мнению зарубежных специалистов, доля стальных деталей в самолетах следующих поколений упадет с 10 до 5 %. Ожидается также увеличение объема применения алюминиевых сплавов с литием и композиционных материалов.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

2.1. Состав и специфика химических свойств

Титан и сплавы на его основе характеризуются весьма благоприятным сочетанием физико-механических и химических свойств, главными из которых являются высокая удельная прочность, тепло- и коррозионную стойкость [2].

Сплавы на основе титана, содержащие добавки легирующих элементов по химическому составу представляют собой двойные Ti-Al (BT-5), тройные Ti-Al-Cr (BT-3), Ti-Al-Mo (BT-8), Ti-Al-V (BT-6), Ti-Al-Mn (OT-4), Ti-Al-Sn (BT5-1), четверные Ti-Al-Cr-Mo (BT3-1, BT-15) и более сложные системы. Но так как сплавы титана содержат еще некоторое количество примесей Fe, Si, O₂, N₂, H₂, то их следует рассматривать как весьма сложные многокомпонентные системы [3].

Таблица 3.

Химический состав титановых сплавов [1]

Марка сплава	Содержание основных компонентов в %					Содержание примесей в % (не более)					
	Al	Cr	Mo	V	Mn	Fe	Si	C	O	N	H
α - сплавы											
BT1-1	-	-	-	-	-	0,3	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
BT1-2	-	-	-	-	-	0,3	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
BT5	4-5,5	-	-	-	-	0,3	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
BT5-1	4-5,5	2-3	-	-	-	0,3	0,15	0,1	0,2	0,05	0,015
(α + β) - сплавы											
BT3	4-6,2	2-3	-	-	-	0,8	0,4	0,1	0,2	0,05	0,015
BT3-1	4,5-6,2	1-2,5	1-2,8	-	-	1,5	0,4	0,1	0,2	0,05	0,015
BT6	4,5-6,5	-	-	3,5-4,5	-	0,3	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
BT8	5,8-6,8	-	2,8-3,8	-	-	0,4	0,35	0,1	0,15	0,05	0,015
OT4	2-3,5	-	-	-	0,8-2	0,4	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
BT14	3,5-5,5	-	2,8-3,5	0,3	0,3	0,4	0,15	0,1	0,15	0,05	0,015
β- сплавы											
BT15	2,5-3,5	9,5-11,5	7-8	-	-	0,3	0,15	0,1	0,12	0,05	0,015

Отмечая высокую коррозионную стойкость титана и его сплавов на воздухе, в морской воде и ряде кислот, следует указать, что при повышенной температуре титан и его сплавы приобретают чрезвычайно высокую химическую активность. Они энергично взаимодействуют с водородом водяного пара, кислородом и азотом воздуха, а так же с галоидами, углеродом, серой и другими элементами. Интенсивное поглощение водорода начинается при 300°С, кислорода- при 500°С, азота-при 600°С.

С повышением температуры интенсивность поглощения этих газов резко возрастает [3]. Изучение явления поглощения газов показало, что кислород, азот и водород не только образуют соединения на поверхности титана или его сплавов, но и проникают в кристаллическую решетку, образуя твердые растворы внедрения резко повышая твердость и хрупкость титана или сплава.

Взаимодействие с газами, значительно ухудшает механические свойства сплавов. Уже при небольшом увеличении содержания кислорода и азота в титане резко возрастают его твердость и прочностные характеристики (σ_B , σ_{02}) а пластические свойства (δ , α_H , ψ) столь же резко падают, что приводит к охрупчиванию металла. Так, при увеличении содержания кислорода до 0,25% пластические свойства сплава резко снижаются, а при увеличении содержания кислорода до 0,35% наступает хрупкое разрушение. Уменьшается разность между пределом прочности и пределом текучести, что является показателем технологической пластичности. Наиболее интенсивное изменение указанных свойств вызывает азот, наименее углерод [3].

Как уже отмечалось, на поверхности титановой заготовки при повышенной температуре в результате взаимодействия титана с различными атмосферными газами происходит интенсивное образование различных соединений. Возникает окалина, состоящая из ряда окислов титана (от простых TiO Ti_2O_3 TiO_2 , до более сложных- Ti_3O_2 Ti_3O_5 Ti_7O_{12}), а также включающая нитрид титана TiN . Окислы и нитриды титана имеют высокую твердость –8-9 единиц шкалы Мооса, а микротвердость-2160 кг/мм².

Кроме влияния на механические свойства, кислород и азот, растворенные в соответствующих количествах в поверхностном слое титанового сплава, вызывают в нем фазово-структурные превращения. Они заключаются в образовании характерной α -структурой, поскольку эти элементы являются стабилизаторами α -фазы. Возникновение такой α -фазы всегда в той или иной степени имеет место при различных способах горячей обработки на воздухе [4].

Так как этот альфированный слой имеет низкие пластические характеристики, то его присутствие в готовой детали не допустимо и поэтому он должен полностью удаляться последующей механической обработкой. Однако из-за высокой твердости альфированного слоя его удаление при помощи режущих инструментов вызывает значительный износ инструмента и возможно только при низких значениях показателей резания.

Рассмотренное свойство титановых сплавов не может не сказаться и при осуществлении процесса резания, поскольку возникающие при этом высокие температуры значительно превышают те, при которых титан начинает активно реагировать с азотом и кислородом.

2.2. Механические свойства титановых сплавов

Титановые сплавы в отожженном состоянии по прочности в 2,5-3 раза превосходят алюминиевые сплавы, в 1,5-2 раза углеродистые и нержавеющей стали. В этом отношении они аналогичны лучшим маркам высоколегированных конструкционных (18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 40ХНМА) и теплостойких (ЭИ891, 1Х12Н2ВМФ) сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе (ХН77ТЮР, ЭИ867) после термической обработки [3].

Некоторые же сплавы титана, например, сплавы с β -структурой (BT15) в закаленном и подвергнутом старению состоянии превосходят по прочностным характеристикам указанные стали и сплавы.

Титановые сплавы по своей удельной прочности превосходят сплавы на основе алюминия, железа и никеля. Однако по своим пластическим свойствам титановые сплавы даже в отожженном состоянии не превосходят сплавы на основе железа и никеля. Предел прочности титановых сплавов незначительно превышает предел текучести. У сталей и сплавов на никелевой и алюминиевой основе этот предел значительно больше. Это свидетельствует о том, что пластическая деформация при растяжении титановых сплавов невелика.

Данные исследований [4], позволяют предположить, что и в процессе резания титановых сплавов их пластические деформации вряд ли будут значительными.

2.3. Физические свойства

К особенностям физических свойств титана и его сплавов относят их низкий модуль упругости, низкую теплопроводность и высокую теплоемкость. Низкий модуль упругости, означая повышенную склонность титановых сплавов к упругому деформированию, обуславливает последнее при обработке материалов резанием. Сравнительно со сплавами на основе никеля, железа и алюминия теплопроводность сплавов на основе титана ниже в 4; 5 и 17 раз [3]. Весьма низкие теплофизические свойства титановых сплавов представляют собой фактор, весьма негативно влияющий на обрабатываемость их резанием.

Физико-механические свойства титановых сплавов представлены в табл.2.

2.4. Металлографическая структура и классификация титановых сплавов

Титан обладает полиморфизмом и существует в двух аллотропических модификациях. Низкотемпературная модификация, называемая α -титаном существует при температуре ниже $882,5^{\circ}\text{C}$ и характеризуется гексагональной решеткой с параметрами, $a=2,9504 \text{ \AA}$ и $c=4,6833 \text{ \AA}$ при температуре 25°C . Высокотемпературная модификация, называемая β -титаном, существует при температуре выше $882,5^{\circ}\text{C}$ и имеет кубическую объемноцентрированную решетку с параметром, $a=3,3065\pm 0,0001 \text{ \AA}$ при 900°C [3].

Все легирующие элементы, применяемые при разработке титановых сплавов, делят на три группы:

1. Элементы, стабилизирующие α - модификацию титана и называемые α - стабилизаторами, они повышают температуру аллотропического превращения титана и расширяют область α - фазы. К их числу относят алюминий, кислород, азот и углерод.

2. Элементы, стабилизирующие β -модификацию титана и называемые β -стабилизаторами, они повышают температуру аллотропического превращения титана и расширяют область β -фазы. Ими являются хром, железо, молибден, ванадий, марганец, кремний и др.

3. Элементы, слабо влияющие на фазовый состав титановых сплавов и составляющие группу нейтральных упрочнителей. К ним относят олово, цирконий и германий [3].

К сплавам с α - структурой относят сплавы ВТ5, ВТ5-1и другие. Сплавы характеризуются высокой термической стабильностью, хорошей свариваемостью аргоно-дуговой сваркой, более низкой пластичностью, чем сплавы с β - и ($\alpha+\beta$)-сплавы, и неспособностью к упрочнению термической обработкой.

К β -сплавам относят ВТ15 и другие. Они сочетают в себе хорошую пластичность и свариваемость и потому находят широкое применение в промышленности [2].

ГЛАВА 3. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В отличие от обычных конструкционных материалов, включая и высокопрочные, титановые сплавы сохраняют высокие прочностные свойства даже при повышенных температурах, что затрудняет их обработку резанием. Поэтому повышение скорости резания и, следовательно, температуры обработки не уменьшает сил резания, а усиливает абразивный и адгезионный износ инструмента вследствие его размягчения (самоотпуска).

Механическая обработка деталей из титановых сплавов существенно затруднена по сравнению, например, с алюминиевыми сплавами и конструкционными сталями. Это объясняется характерными свойствами титановых сплавов: высоким отношением предела текучести к пределу прочности ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$), составляющим величину 0,85 -0,95 (для сталей 0,65-0,75); относи-

тельно низкой теплопроводностью; налипанием титана на инструмент; высокой химической активностью по отношению к газам при повышенных температурах; неоднородностью свойств срезаемого слоя вследствие ликвации легирующих элементов; особенностями процессов получения полуфабрикатов и т.д. Высокое отношение ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$) вызывает повышенную наклепываемость сплавов, что снижает их пластические свойства и вызывает повышенный износ режущего инструмента. Этот фактор, а также низкая теплопроводность сплавов создают повышенную температуру в зоне резания, что в свою очередь, способствует загазованности сплава (особенно в тонких сечениях). Насыщение металла газами исключает возможность пластической деформации стружки и приводит к тому, что ее усадка становится отрицательной. Все это способствует быстрому износу режущего инструмента как по передней грани от трения о стружку, так и по задней - от трения об обработанную поверхность. Неоднородность свойств металла, и в частности поверхностного слоя детали, вносит свою лепту в износ инструмента, создавая даже при непрерывной обработке как бы условия прерывистого резания. Обрабатываемость титановых сплавов резанием, аналогична обрабатываемости нержавеющей сталей аустенитного класса. Между стружкой титана и инструментом имеется очень небольшая контактная поверхность в результате чего в зоне резания возникают высокие удельные давления и температуры. К тому же титан обладает очень низкой теплопроводностью, что затрудняет отвод тепла из зоны резания. В результате титан легко налипает на инструмент и быстро изнашивает его.

Все эти условия, снижая стойкость инструмента, приводят к необходимости применения для режущего инструмента более износостойких быстрорежущих сталей, чем для обработки сталей, и обильного охлаждения зоны резания. Но даже при принятии таких мер режимы резания, особенно скорости, должны быть снижены по сравнению с обработкой сталей в 3-4 раза для обеспечения приемлемой стойкости инструмента, особенно при обработке на станках с ЧПУ. Поэтому производительность при обработке резанием деталей из титановых сплавов существенно снижается по сравнению с обработкой сталей.

При обработке деталей из титановых сплавов образуется хрупкая стружка, которая легко схватывается с материалом инструмента и вызывает его интенсивное выкрашивание и сколы. Упрочнение наклепом, а так же высокая склонность к окислению при повышенных температурах также затрудняют обработку резанием. Низкая теплопроводность вызывают увеличение адгезионного износа и наростообразования. Интенсивное наростообразование не снижается даже существенным уменьшением скорости резания, что особенно характерно при резании твердосплавным инструментом. Нарост образуется на передней поверхности инструмента в зоне схода стружки в условиях действия высоких температур и давлений. Процесс наростообразования усугубляется еще и тем, что обработка этих сплавов характеризуется небольшой площадкой контакта стружки с инструментом, в результате которого на режущей кромке создаются концентрации высоких напряжений.

Образующийся при резании нарост представляет собой наваренный на инструмент, окисленный и упрочненный абразивостойкий материал обрабатываемой детали из титанового сплава, причем прочность сцепления нароста с инструментом настолько высока, что в процессе резания периодический отрыв нароста сопровождается вырыванием материала инструмента и нарушением целостности режущей кромки.

Особенно отчетливо подобное схватывание наблюдается при фрезеровании, когда прочность сцепления обрабатываемого материала с инструментом настолько высока, что вызывает выкрашивание и вырывание отдельных участков инструмента, особенно твердосплавного. Вследствие этого чистота поверхности при обработке значительно ниже, чем для обычных конструкционных материалов, причем с повышением прочности чистота обработанной поверхности повышается.

3.1. Тепловые явления в процессе резания

Экспериментальным и аналитическим путем установлено, что при резании титановых сплавов возникают весьма высокие температуры, в 2-3 раза превосходящие температуры, возникающие при обработке сплавов на основе железа и алюминия и близкие к температурам, возникающим при резании жаропрочных сплавов. Так температура резания при точении титанового сплава ВТ3-1 достигает 800°C уже при $v=40$ м/мин, $s=0,17$ мм/об и $t=1,5$ мм [4].

Причина возникновения высоких температур обуславливается характерной особенностью теплофизических свойств титановых сплавов: сравнительно низкой теплоемкостью, малым удельным весом и в особенности очень низким коэффициентом теплопроводности. Вследствие этого значительная часть тепла, выделяющегося при резании, передается на режущий инструмент и в стружку, а в обрабатываемую заготовку отводится малая его часть.

Влияние параметров теплофизических свойств (λ , γ , c) титановых сплавов на температуру настолько велико, что в условиях меньшего, по сравнению со сталями, тепловыделения температура деформированной зоны и прилегающих слоев титановых сплавов значительно выше, чем у сталей. Установленные зависимости этих характеров представляет одну из важных характеристик влияния физических свойств титановых сплавов на обрабатываемость их резанием.

Возникновение высоких температур в зоне резания заставляет значительно снижать режимы резания, (по сравнению со сталями в 3-4 раза) так как при больших значениях скорости резания, подачи и глубины срезаемого слоя, температура в зоне резания очень скоро начинает превосходить теплоустойчивость твердосплавного инструмента, не говоря уже об инструменте из быстрорежущих сталей.

3.2. Износ режущего инструмента

3.2.1. Износ режущего инструмента при обработке по корке

При обработке титановых сплавов наибольшие трудности возникают при выполнении обдирочных операций, проводимых для удаления дефектного поверхностного слоя. Трудности обуславливаются тем, что при обработке со снятием корки происходит особенно интенсивный износ инструмента.

Характеру и интенсивности заступления режущего инструмента может быть дано следующее объяснение. Поверхности слитков и полуфабрикатов титановых сплавов покрыты окалиной и коркой, которые образуются при взаимодействии титана с кислородом и азотом воздуха и диффузии этих газов в кристаллическую структуру сплава (α -слой), что при резании приводит к тому, что режущие элементы инструмента подвергаются истирающему воздействию абразивного характера. Вследствие этого интенсивно изнашиваются главным образом задняя поверхность и режущая кромка, особенно в месте касания с коркой. Передняя же поверхность резца не контактирует с коркой, прирезцовый слой характеризуется значительно меньшей твердостью и однородной структурой, а скорость резания при обработке по коре невелика, поэтому эта поверхность в меньшей степени подвергается истирающему воздействию. Образование сколов по передней и задней поверхностям и выкрашивание режущей кромки при точении режущими пластинками из сплавов ВК2, ВК6, ВК4, ВК3М, Т14К8, Т15К6, ТТ20К9, можно объяснить тем, что при черновой обработке снимается неравномерный по глубине слой и действует переменная нагрузка (табл. 3). Периодическое изменение нагрузки на режущую кромку резца подобно удару, который при прерывистом резании вызывает выкрашивание кромки и сколы по рабочим поверхностям резца, причем наиболее значительные сколы наблюдаются в месте касания кромки с коркой. По видимому в данном случае возникают и усталостные напряжения в материале инструмента у режущей кромки, приводящие к ее хрупкому разрушению [4].

Кроме отмеченных видов разрушения (абразивного износа, хрупкого разрушения, смятия), наблюдается износ, обусловленный адгезионными явлениями. Последний наиболее характерен для передней поверхности инструмента при обдирочных операциях, выполняемых со снятием корки, а также при точении с ее удалением со средней скоростью резания $v=40-60$ м/мин и подачей $s>0,2$ мм/об, причем особенно при проведении этой обработки резцами с пластинками из двух - и трехкарбидных сплавов. Стойкое налипание наблюдается на пластинках из сплавов ВК3М, ВК4, ВК6М [4]. В меньшей степени явление адгезии наблюдается при обработке резцами с пластинками из ВК6, ВК8, ВК8Т, ВК12, ВК12Та [4].

Сущность явления адгезии представляется в налипании, смачивании материала инструмента материалом заготовки. Это налипание происходит из-за того, что поверхностная энергия атомов материала инструмента в процессе резания и связанных с ним тепловых явлений, выражающихся в значи-

тельном нагреве инструмента и стружки, начинает превосходить энергию связи атомов обрабатываемого материала между собой. В результате чего происходит очень прочное схватывание стружки, фактически приваривание ее к поверхности инструмента.

При периодическом изменении условий резания происходит срыв приварившихся частиц обрабатываемого материала вместе с материалом инструмента. Особенно выражено это явление при обработке многолезвийным инструментом-фрезеровании и обработке отверстий - сверлении, развертывании, нарезании резьб. При фрезеровании срезанная зубом стружка, как правило, приваривается к его передней поверхности и отскакивает лишь при последующем врезании, что приводит к частым выкрашиваниям и сколам.

При сверлении, особенно мелких отверстий, вследствие затрудненного отвода стружки, она может налипнуть на инструмент до такой степени, что силы схватывания вызовут поломку инструмента в отверстии.

Применение в качестве обрабатываемого материала быстрорежущих сталей марки P18, P9K5, P9Ф5 при обработке по корке с применением стандартной эмульсии и прочих условиях, аналогичных условиям резания инструментом, оснащенным пластинками из твердых сплавов, подвержены интенсивному износу, как по передней, так и по задней поверхности, достигающему катастрофического значения уже в самом начале резания. Даже при обработке со скоростью в 2,5 раз меньше, чем при точении резцом из сплава BK8, износ резцов из быстрорежущих сталей достигает значительной величины [4].

3.2.2. Износ режущего инструмента при чистовом и получистовом точении

При чистовом и получистовом непрерывном точении исследуемых титановых сплавов резцами, оснащенными пластинками из однокарбидного твердого сплава, процесс износа может быть представлен в следующем виде (Табл. 4). В начальный период резания на задней поверхности резца, вдоль режущей кромки, наблюдается появление характерных штрихов износа, являющиеся результатом трения между контактными поверхностями инструмента и заготовки. Износ по передней поверхности при этом представляет след сходящей стружки и имеет вид лунки. При дальнейшем резании происходит развитие износа, как по передней, так и по задней поверхности.

Исследования проводились при резании сплавов BK8 и BK15 для следующих режимов резания: $v = \text{м/мин}$; $s=0,2-0,5 \text{ мм/об}$; $t = 0,5-1,5 \text{ мм}$. Средняя стойкость твердосплавного инструмента при таких условиях составляет 20-26 мин [4].

Повышенная интенсивность износа режущего инструмента при получистовом и чистовом точении титановых сплавов, определяется двумя факторами: повышенной истирающей способностью титановых сплавов и высокой температурой граничных слоев. В зависимости от условий резания степень влияния этих факторов изменяется. При повышении скорости и подачи

Таблица 5

Износ режущего инструмента при черновой обработке титановых сплавов

Сплав	С	Характер износа режущего инструмента
K8	В	Износ по задней поверхности без сколов и выкрашиваний
K8Ta	В	
K12Ta	В	
K3M	В	Значительные сколы по задней поверхности, в месте контакта задней поверхности резца и заготовки, сколы и вырывания по передней поверхности
K4	В	
K6M	В	
K6	В	
K12	В	Затупление в результате смятия контактных поверхностей по режущей кромке
K15	В	
K15M	В	
15K6	Т	Хрупкий износ, подобно BK3M, BK4, BK2
14K8	Т	
5K10	Т	Весьма интенсивный, хоть и менее хрупкий износ, чем у T15K6, T14K8
5K12B	Т	
T10K8B	Т	Износ аналогичен T15K6, T14K8
T20K9	Т	
18	Р	Катастрофический износ в самом начале резания
9K5	Р	
9Ф5	Р	

*Результаты получены при следующих режимах резания: $v=10$ л/мин, $s=0,3$ об/мин, $t=1$ л мм. Геометрические параметры резца: $\alpha=\alpha_1=\varphi_1=15^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $R=0,6-0,8$ мм. [5]

Таблица 6.

Износ режущего инструмента при чистовой и получистовой обработке титановых сплавов

Сплав	Характер износа режущего инструмента
-------	--------------------------------------

ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6 ВК6М ВК8 ВК8Та ВК12Та	Износ в виде лунки по передней поверхности, при дальнейшем резании развивающийся и приводящий к выкрашиванию режущей кромки. По задней поверхности образуется фаска износа. При этом происходит не только истирание, но и выкрашивание кромки, что при дальнейшей обработке приводит к выкрашиваниям и сколам.
Двух-трехкарбидные сплавы	Более интенсивный износ того же характера.
Быстрорежущие стали	Значительный износ по передней и задней поверхностям при скоростях резания $v=50-60$ м/мин; использование возможно лишь при резании со скоростями $v=10-15$ м/мин. При резании наблюдается быстрое притупление режущих кромок.

возрастает значение теплового фактора и наступает мгновенный износ. При понижении этих параметров доминирующее значение приобретает истирающая способность титановых сплавов. Повышенная истирающая особенность титановых сплавов связана с особенностями их физико-химических свойств и структуры. При исследовании деформации срезаемого слоя и качества обработанной поверхности титановых сплавов выявлено, что при определенных температурных условиях срезаемый и остающийся слой из-за высокой химической активности титана к кислороду и азоту воздуха поглощают эти газы, что вызывает их упрочнение и охрупчивание. Упрочнение слоев и альфирирование их структуры приводят к более интенсивному истиранию контактных поверхностей режущего инструмента, как это наблюдается при черновой обработке по корке [4].

В соответствии с этим при небольших и средних скоростях резания ($v=20-40$ м/мин), когда из-за невысокой температуры в зоне резания диффузия незначительна, износ протекает с обычной интенсивностью и не приводит к разрушению режущей кромки инструмента.

При повышении скорости резания температура в зоне резания значительно возрастает, срезаемые слои в той или иной степени насыщаются газами, упрочняются и охрупчиваются, развитие абразивного износа происходит более интенсивно. При скоростях резания $v=100-130$ м/мин роль теплового фактора возрастает и интенсивное развитие износа является результатом влияния этого фактора.

Механизм процесса износа резцов с твердосплавными пластинками при точении титановых сплавов представляется следующим. Под влиянием развивающейся в процессе резания высокой температуры происходит снижение прочностных характеристик титанового сплава и материала режущего инструмента в зоне резания. Однако снижение прочности поверхностных слоев обрабатываемого титанового сплава под влиянием температурного фактора не является значительным, поскольку вследствие поглощения ими кислорода и азота воздуха происходит упрочнение этих слоев [4]. Побочным результатом этого является увеличивающаяся адгезия. В результате происходит ин-

тенсивный износ режущего инструмента под действием вышеперечисленных факторов.

3.3. Повышение эффективности обработки резанием титановых сплавов твердосплавными инструментами и инструментами из быстрорежущей стали

При резании титановых сплавов наиболее широко используется твердосплавный инструмент (в основном вольфрамовой группы) и инструмент из быстрорежущих сталей.

Применение твердых сплавов, легированных карбидом титана не дает существенного преимущества при обработке титановых сплавов вследствие повышенного химического взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом.

Для увеличения стойкости инструмента и повышения производительности обработки необходимо применять прогрессивную технологию производства инструмента.

Уже созданы твердые сплавы со сверхтонкой структурой (особомелкозернистые сплавы типа ОМ-ВК6-ОМ, ВК-10-ОМ, ВК15-ОМ), в которых путем измельчения зерна удалось повысить вязкость и твердость. Эти сплавы имеют повышенную плотность, что позволяет улучшить шлифуемость и получать при затачивании острую кромку.

Повышает эффективность обработки титановых сплавов применение инструмента из порошковых быстрорежущих сталей [5].

Немалым резервом в повышении эффективности обработки титановых сплавов является выбор состава СОЖ и метод подводки в зону резания. Так применение СОЖ при резании титановых сплавов стальным инструментом позволяет повысить скорость резания на 20- 40%. Применение СОЖ обеспечивает также повышение стойкости инструмента и качества обработанной поверхности. При обработке титановых сплавов весьма эффективны сульфированные СОЖ с поверхностно-активными присадками, которые, адсорбируясь на контактных поверхностях, пластифицируют поверхностный слой обрабатываемого материала и облегчают взаимное перемещение контактных поверхностей инструмента и обрабатываемой детали. При этом уменьшается наклеп металла и напряженное состояние инструмента. Применяемые СОЖ (Аквол-2, Уринол-1, Аквол-10) представляют собой смеси на основе масел, куда входят эмульгаторы, различные активные присадки и т.п. [5]. Так же рекомендуется применять хлорированные СОЖ, которые существенно уменьшают адгезию [8].

Кроме того, для повышения стойкости инструмента опробуются твердые смазки на основе дисульфида молибдена, наносимые на рабочие поверхности инструмента. Применение дисульфида молибдена позволяет повысить стойкость фрез, сверл, метчиков в 3-4 раза вследствие снижения наростообразования и улучшения условий резания[5].

3.4. Упрочнение инструментов для обработки титановых сплавов

Одним из важных факторов, определяющих производительность обработки резанием и высокое качество обработанных изделий, является стойкость режущего инструмента, сохранение геометрии режущей кромки и высокой твердости поверхностного слоя в работе.

Основными требованиями, предъявляемыми к инструментальному материалу для обработки титановых сплавов, являются повышенная прочность и вязкость, в сочетании с достаточно высокой твердостью, низкая химическая активность к обрабатываемому материалу, высокая теплостойкость и стойкость к наростообразованию.

Существенным резервом повышения производительности обработки титановых сплавов и повышения износостойкости инструмента является упрочнение инструмента путем нанесения износостойких покрытий.

Для обработки титановых сплавов применяются одно- двух - и многослойные покрытия, которые считаются наиболее перспективными.

Эти покрытия имеют верхний слой из твердых материалов TiCN, Al₂O₃, BN и других и вязкие промежуточные зоны, а также покрытия с постепенным изменением состава по толщине слоя [5].

Подобные покрытия предохраняют инструмент от абразивного и адгезионного износа, уменьшают отслаивание и скалываемость инструмента.

Выявлено, что состав износостойких покрытий существенно влияет на процессы, происходящие на контактных площадках инструмента. Покрытия сложного состава, благодаря высокой трещиностойкости, прочностным свойствам, высокому уровню сжимающих и остаточных напряжений сдерживают процессы развития и образования трещин. Уровень контактных и тепловых нагрузок в сочетании с более высокой сопротивляемостью покрытий сложного состава к процессам трещинообразования является одной из причин более высокой работоспособности инструмента с такими покрытиями.

Направленным изменением свойств покрытия путем легирования или изменения состава газовой среды можно управлять термомеханической напряженностью режущего клина инструмента, сдерживать процессы трещинообразования и разрушения.

Многочисленные исследования в области применения различных износостойких покрытий проводились в странах СНГ. Так учеными А. С. Верещакой и И. П. Третьяковым были проведены исследования композиционных, многослойных покрытий, предназначенных для обработки труднообрабатываемых материалов. При этом кристаллохимические свойства и состав элементов соединений выбирали такими, чтобы обеспечить максимальное снижение склонности к схватыванию с обрабатываемым материалом. Как известно, эта склонность снижается при достаточно сильном отличии кристаллохимического строения контактирующей пары. Так, оказалось, что для по-

верхностных слоев композиционных покрытий оказалось выгодным вводить в их состав соединения (нитриды, карбонитриды, карбиды) VI группы переходных металлов, которые имеют большое количество модифицированных фаз, существенно отличающихся по строению от строения большинства труднообрабатываемых материалов.

Эти слои могут обеспечить высокую пассивность композиционного покрытия к обрабатываемому материалу. Для обеспечения термодинамической устойчивости и создания непрерывного ряда растворимости с внутренними слоями покрытия, непосредственно примыкающими к матрице в поверхностные слои было введено некоторое количество соединений металлов IV и V групп, причем их содержание по глубине покрытия непрерывно возрастало. Это позволило обеспечить высокую прочность сцепления покрытия с инструментальной матрицей.

В результате испытаний было выявлено, что для промышленного внедрения целесообразно применять композиционные покрытия на основе соединений титана, циркония и молибдена. Так, при обработке сплава BT20 режущими пластинами из ВК6 наилучшие результаты показало покрытие (25% Ti-75%Cr)N. Применение данного покрытия позволяет увеличить скорость резания до $v=55-80$ м/мин, а стойкость инструмента возросла в 2-2,5 раза. Покрытия наносились методом КИБ [7].

Исследования, проведенные в СНГ, выявили перспективность нанесения покрытий на инструмент с режущей частью из ВК6 покрытий на основе MoN, (Mo+Cr)N, (Nb+Zr)N при обработке резанием титанового сплава BT20.

Было исследовано влияние покрытий на стойкость спирального сверла диаметром 9 мм. В результате исследований выявили: покрытия из Mo, Cr повышают стойкость сверла в 3 раза; покрытия из Mo+ZrN, Cr+ZrN – в 4,5 раза; покрытия из Mo+TiN – в 3,5 раза; покрытия из Cr+TiN – в 2 раза; покрытия из TiN – в 1,5 раза.

Автором данного учебного пособия также проводились исследования стойкости инструментов с износостойкими покрытиями, нанесенными по технологии, разработанной им, покрытия были сформированы ионно-плазменным методом. Испытания проводились на Ташкентском Авиационном Производственном Объединении имени В. П. Чкалова и дали следующие результаты:

- у метчиков из P18 с покрытиями (TiN), (Ti,Cr)₂N при нарезании резьбы на титановом сплаве BT22 стойкость возросла в 2,6 раз;
- у сверл из P18 с покрытием TiN стойкость возросла в 1,8 раз.
- у сверл из P18 с покрытием (Ti,Cr)N стойкость возросла в 2 раза.
- у сверл из P18 с покрытиями на основе трехкомпонентных нитридов хрома и ванадия (V,Cr)₂N +(V,Cr)N стойкость возросла в 3,5 раз [6].

Исследования, проведенные Ю.Г. Кабалдиным, Н. Е. Кожевниковым и В.В. Селезневым показали рост стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали P6M5K5 с покрытием Mo+ZrN и Cr+ZrN в 4,5 раза при обработке титанового сплава BT20 [9].

В Российской Федерации ведется внедрение инструмента с износостойкими покрытиями, которые наносятся ионным осаждением в вакууме на установках типа ННВ 6.6-И1, “Булат”, ИЭТ, ПУСК и т.п. при температурах инструмента порядка 400 - 600° С. Толщина покрытий составляет 1-10 мкм. Покрытия предназначены для упрочнения резцов, фрез, сверл, метчиков, развёрток, зенкеров и т.п., изготовленных из теплостойких твёрдых сплавов и быстрорежущих сталей. В отличие от известных простых покрытий по типу нитрида (карбида) титана или окислов, разработанные покрытия представляют собой композиции (набор) соединений по типу боридов, силицидов, нитридов и карбидов тугоплавких металлов. Подбором оптимального многофазного состава покрытия для конкретных инструментов и условий эксплуатации достигается износостойкость сравнимая или даже превосходящая показатели лучших образцов импортного инструмента фирм Sandvik Coromant, Metall Werke Pianssee и др. Композиционные многофазные покрытия гарантируют повышение износостойкости не менее чем в 2-3 раза и рекомендуется, в первую очередь, для упрочнения инструмента, предназначенного для резания труднообрабатываемых материалов - высоколегированных и закалённых сталей, титановых сплавов и т.п.

Московский Государственный технический университет «Станкин» разрабатывает проект нанесения на инструмент из быстрорежущих сталей износостойких покрытий. Целью проекта является разработка технологии повышения работоспособности и надежности инструмента из быстрорежущей стали и концепции комплексной упрочняющей обработки на базе исследований контактных процессов и теплового состояния инструмента при резании различных материалов.

Формирование диффузионной термостабильной зоны толщиной 30-50 мкм на границе раздела покрытие — инструмент позволяет сохранить формуустойчивость режущего клина при повышенных температурах, возникающих при резании труднообрабатываемых материалов, и обеспечивает благоприятные условия для работы покрытия (толщиной 3- 10 мкм). Использование инструмента из быстрорежущей стали с комплексной обработкой на операциях механической обработки металлов обеспечивает повышение производительности обработки резанием на 75-100%; повышение стойкости инструмента в 4-6 раз при резании конструкционных сталей, в 2,5-3,5 раза — при резании коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, в 2-2,5 раза — при обработке никелевых и титановых сплавов; сокращение расхода сложнопрофильного инструмента на 30%, вследствие увеличения суммарного количества повторных переточек инструмента. Сегмент рынка, где может быть использован режущий инструмент из быстрорежущей стали с многослойным износостойким покрытием: машиностроение, авиастроение, автомобилестроение. Имеются предварительные и действующие соглашения о закупке оборудования и поставках режущего инструмента из быстрорежущей стали с многослойным покрытием с ОАО «АВТОВАЗ» (Тольятти) и заводом «Салют» (Москва), МИЗ (Москва), КНААПО (Комсомольск на Амуре).

В Томском Государственном Техническом Университете разработаны технология и установка ВМН-5 “Квант” для нанесения на поверхность изделия нанокристаллических структур высоковакуумными магнетронами с одновременной бомбардировкой высокоэнергичными газовыми ионами. Технология и оборудование позволяют получать износостойкие защитные нанокристаллические покрытия на большую площадь материала без дополнительной последующей обработки в целях многократного повышения эксплуатационных характеристик инструмента, материалов и изделий.

С помощью этих методов можно получить: сверхтвердые (35–60ГПа), износостойкие, коррозионностойкие, антифрикционные покрытия толщиной до 20 мкм с размером кристаллита от 1 до 20 нм на режущий инструмент, штампы, пресс-формы, рабочую поверхность деталей машин. Увеличение в 1,5 – 4 раза срока службы упрочненного инструмента в зависимости от условий работы и материала. Повышение скорости механической обработки, а также возможность обработки в отсутствие смазочно-охлаждающих жидкостей. Повышение ресурса работы и придание новых эксплуатационных качеств металлообрабатывающего инструмента, рабочих деталей машин и ответственных металлоконструкций.

Фирма «Kennametal» (США) выпускает твердосплавные пластины КС850 со специальным многослойным покрытием, которое имеет повышенную стойкость к скалыванию, наростообразованию и кратерному износу даже при тяжелых режимах резания, что позволяет повысить скорость обработки и увеличить подачу.

Многие зарубежные фирмы приступили к массовому производству стальных инструментов с износостойкими покрытиями, что позволяет в 1,5-2 раза увеличить скорость резания. Покрытия наносятся на инструмент из быстрорежущей стали при температуре 500-600°С без структурных превращений. Износостойкие покрытия на инструменте из быстрорежущей стали повышают теплостойкость инструмента, снижают склонность режущей кромки к размягчению в условиях возникновения высоких температур при резании титановых сплавов и повышает абразивную стойкость инструмента [5].

Покрытия TiC, TiN и другие обладают повышенной твердостью (HV 2000-4000 кгс/мм²) и не имеют резкой границы раздела со стальной подложкой, что обеспечивает сочетание твердой и химически инертной поверхности и вязкой сердцевины [5].

Фирма Sumitomo denki Kogyo (Япония) разработала новый процесс Cold Ace нанесения покрытий из TiC, TiN на быстрорежущие стали. Эти покрытия наносятся в камере в среде реактивного газа под давлением $3 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.

Эта фирма также выпускает инструмент из быстрорежущих сталей с подобными покрытиями из соединений титана.

Покрытия толщиной 2-6 мкм наносятся на стальной режущий инструмент любой конфигурации, причем технология и температурный режим (до 500°С) процесса нанесения покрытий позволяют получить прочное сцепле-

ние покрытия с основным металлом без нежелательных изменений свойств стали. Пониженная скалываемость инструмента объясняется постепенным переходом от вязкой основы к твердой поверхности, препятствующая росту трещин в теле инструмента.

Стойкость режущих пластин благодаря покрытию Cold Ace возросла в 5-20 раз, а срок службы инструмента увеличивается в 3-8 раз при возрастании скорости резания и подачи в 1,5-2 раза [5].

Перспективными при обработке титановых сплавов являются покрытия на основе нитридов Mo, Hf, Zr и других.

Рост твердости поверхностного слоя твердосплавных пластин также достигается химико-термической обработкой при 1450°C, перед которой пластины покрываются пастой из окислов TiO₂ и ZrO₂. В результате подобной обработки образуется диффузионный слой, насыщенный твердыми частицами карбидов TiC, ZrC и другими, а в промежуточном слое в результате распада карбида образуются переходные зоны с наличием твердых растворов TiC-C, TiC-ZrC, которые увеличивают твердость поверхностного слоя и снижают износ инструмента. При резании твердосплавными пластинами после высокотемпературной обработки их в вакууме в пастах из окислов отмечается пониженное схватывание и налипание стружки к режущим кромкам, что снижает температуру в зоне контакта стружки и инструмента [5].

Для повышения стойкости стального инструмента широко используют борирование, карбонитрирование, ионное нитрирование (азотирование) диффузионное насыщение поверхности карбидами B, Cr, Nb, а также термоэлектрический способ насыщения Ni и P.

Стойкость стального инструмента после ионного азотирования возрастает в два раза [5].

Из физических методов упрочнения наиболее распространено лазерное, в 2-5 раз повышающее стойкость инструмента. Под воздействием лазерного излучения в быстрорежущих сталях происходят структурные и фазовые превращения в условиях сверхскоростного нагрева и охлаждения материала [5].

Механические способы упрочнения инструмента наиболее доступны и весьма перспективны. Эффект упрочнения при виброабразивной и дробеструйной обработке заключается в наклепе и повышении твердости поверхности инструмента. Скругление режущей кромки и создание сжимающих напряжений способствует снижению сколов и выкрашивания инструмента, а также наростообразования при резании титановых сплавов. Для твердосплавных пластин и мелкогабаритного инструмента, предназначенных для обработки титановых сплавов, особенно эффективна виброабразивная обработка. Наибольший эффект виброабразивного упрочнения инструмента проявляется при непрерывном резании.

Так, стойкость пластин, предназначенных для фрезерования увеличилась в 1,2-2 раза. Наибольшее повышение стойкости наблюдается у пластин с износостойкими покрытиями, нанесенными после виброабразивной обработки пластин [5].

3.5. УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ САМОЛЁТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Усталостные характеристики деталей самолётов обусловлены качеством поверхностного слоя, образующегося после обработки резанием. Вследствие низкой теплопроводности и высокой химической активности обрабатываемого материала применение шлифования как процесса финишной обработки ограничено для титановых сплавов. При высокой температуре на них гораздо легче образуются прижоги, чем на сталях, которые существенно снижают усталостную прочность.

Прижоги могут содержать загазованные слои, не обладающие никакой пластичностью и, которые зачастую растрескиваются. Кроме того, шлифование образует в поверхностном слое остаточные напряжения растяжения, снижающие сопротивление усталости. Поэтому шлифование, если оно используется при обработке деталей из титановых сплавов, должно проводиться при пониженных скоростях резания и по возможности заменяться лезвийной обработкой либо низкоскоростными методами абразивной обработки, такими, например, как хонингование. Если же применяется шлифование, оно должно выполняться при строго регламентированных режимах с последующим контролем на отсутствие прижогов и сопровождаться упрочнением поверхностным пластическим деформированием (ППД). Такие же условия необходимо выполнять и при использовании абразивной зачистки в случаях, когда применяются ручные шлифовальные машины. Упрочнение ППД деталей из титановых сплавов - одно из обязательных условий обеспечения их работоспособности при повторно-переменных нагрузках.

Титановым сплавам свойственно повышенное рассеяние усталостной долговечности по сравнению со сталями и алюминиевыми сплавами; титановые сплавы особенно чувствительны к состоянию поверхности. Основными факторами, повышающими сопротивление усталости титановых деталей при упрочнении ППД, являются как остаточные напряжения сжатия, так и повышение однородности процессов микропластических деформаций, что обеспечивается выравниванием механических свойств отдельных участков поверхностного слоя за счет наклепа. Все это вкуче снижает рассеяние усталостной долговечности. Упрочнение ППД необходимо также, чтобы снять неблагоприятное воздействие предварительной обработки (шлифование, зачистка, травление, загазованность при термообработке и др.).

Вследствие химического сходства титана с алмазом и его низких антифрикционных свойств нельзя применять непосредственно для титана методы упрочнения ППД, использующие трение скольжения, такие, как выглаживание алмазом и другими материалами, дорнирование и т.д. Эффективными являются методы дробе- и виброударной обработки, но в связи с быстрым истощением пластичности они должны применяться регламентированно по составу и размеру дроби, а также по режимам обработки. Применяются также

обкатывание и раскатывание роликами и шарами, чеканка многобойковыми упрочнителями, обдувка корундовым песком, виброабразивная обработка.

Технологические параметры упрочнения зависят также от величины исходной шероховатости поверхности и вида обработки. В целом сопротивление усталости деталей из титановых сплавов обеспечивается комплексом технологий обработки и упрочнения, подавляющим неблагоприятно действующие факторы, выравнивающим свойства поверхностного слоя и переводящим его в состояние остаточного сжатия.

3.6. ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Для механической обработки титановых сплавов применяют в основном такие же станки, как и при обработке сталей и сплавов на основе других цветных металлов. Ввиду больших усилий резания при обработке титановых сплавов отдается предпочтение станкам более крупных моделей (ФП-7, ФП-9, ФП-27, ВФЗ-М8 и др.).

Основную долю по трудоемкости при изготовлении деталей составляет фрезерование. Особенно большие объемы фрезерных работ приходится на изготовление силовых деталей каркаса самолета: шпангоутов, траверс, лонжеронов, нервюр, балок. На фрезерных станках также обрабатываются детали управления и механизации (каретки, монорельс, качалки и др.)

При разработке и внедрении технологии механической обработки деталей из титановых сплавов достаточно широко используются малооперационные технологические процессы за счет совмещений нескольких операций в одну при выполнении ее на одно и многоинструментальном оборудовании (обрабатывающий центр). Эти технологические операции: наиболее эффективно выполнять на многооперационных станках (обрабатывающих центрах). Так, например, силовые детали из штамповок изготавливают на станках ФП-27С, ФП-17СМН, МА-655А; детали типа: "корпус", "колонна", "кронштейн" из штамповки и фасонной отливки — на станках МА-655А, "Горизонт", ИР-800, ИС-800 панели из листа на станке ВФЗ-М8. На этих станках при обработке многих деталей реализуется принцип "максимальной" законченности обработки в одной операции, что достигается установкой на стол станка одновременно нескольких различных приспособлений с последовательной обработкой детали с двумя и более сторон по одной программе.

Фрезерование переменных малок при изготовлении деталей типа "нервюра", "балка", "траверса" осуществляется:

- 1) на универсально-фрезерных станках с помощью специальных механических или гидравлических копиров;
- 2) на гидравлических копиروفрезерных станках по копирам;
- 3) на трехкоординатных станках с ЧПУ: специальными сборными фрезами с изменяемым в процессе обработки углом; фасонными выпуклыми и вогнутыми радиационного профиля фрезами; концевыми фрезами с привде-

нием к цилиндрической поверхности путем наклона детали к плоскости стола под определенным углом;

4) на многокоординатных станках с ЧПУ, типа ФП-14, ФП-11, МА-655С5.

Для осуществления механической обработки авиационных материалов в странах СНГ разработан ряд станков, соответствующих лучшим мировым образцам, а иногда и не имеющих аналогов в мировой практике. Продольно-фрезерный трехкоординатный трехшпиндельный станок ВФ-33 с ЧПУ предназначен для одновременной обработки тремя шпинделями монорельсов, панелей, балок, нервюр и других деталей легких и тяжелых самолетов. Максимальные размеры обрабатываемых деталей 4000x2500 мм, число фрезерных головок — 3; мощность привода фрезерной головки — 22 кВт, габаритные размеры станка — 13135x6400x5200 мм; масса — 62 т.

Продольно-фрезерный четырехкоординатный четырехшпиндельный станок 2ФП-242В с двумя подвижными порталами и ЧПУ предназначен для обработки крупногабаритных панелей и лонжеронов с переменной малкой для широкофюзеляжных и тяжелых самолетов. Размеры обрабатываемых панелей 2500x2500 мм; число фрезерных головок на каждом портале -2, мощность привода каждого шпинделя — 30 кВт, частота вращения -40-3000 об/мин, габаритные размеры станка 46645x8930x5360 мм, масса 300 т.

Горизонтально-фрезерно-расточной пятнадцатикоординатный с ЧПУ станок ФРС-1 с подвижной колонной предназначен для обработки стыковых поверхностей крыла и центроплана широкофюзеляжных самолетов. Размеры обрабатываемых агрегатов — 8000x2500 мм, габаритные размеры станка — 33000x5500x8400 мм, масса станка - 160 т. На этом станке можно осуществлять фрезерование плоскостей разъема, обработку стыковых отверстий и другие виды обработки резанием.

Гибкий производственный модуль СГПМ-320 включает в себя токарный станок с ЧПУ АТ-320 с магазином на 13 инструментов и автоматический манипулятор установки и съема детали, управляемые от ЧПУ. Этот модуль предназначен для токарной многоинструментальной обработки в автоматическом режиме цилиндрических, конических и фасонных поверхностей деталей авиационной техники. Размеры обрабатываемых деталей $\varnothing 350 \times 140$ мм; габаритные размеры модуля - 10 м. Модуль СГПМ-320 может использоваться как автономно, так и в составе гибкого производственного комплекса.

Гибкий производственный комплекс АЛК-250-2 предназначен для изготовления прецизионных корпусных деталей гидроагрегатов. Размер обрабатываемых деталей составляет 250x250x250 мм, номенклатура обрабатываемых деталей - 32 шт., точность расстояний между осями обрабатываемых деталей - 0,015 мм; занимаемая площадь - 500 м².

Механическую обработку титановых сплавов рекомендуют проводить с малыми скоростями резания при больших подачах и глубинах резания, с обильной подачей охлаждающей жидкости. Точение кованных заготовок осуществляют резцами с пластинками из твердого сплава ВК8. При обработке по газонасыщенной корке рекомендуют следующие геометрические пара-

метры резцов: передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 12^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 14^\circ$, Режимы резания: скорость резания $v = 25 \dots 35$ м/мин, подача $S = 0,5 \dots 0,8$ мм/об; глубина резания t не менее 2 мм. При чистовом и получистовом непрерывном точении применяют инструмент из твердых сплавов ВК4, ВК5, ВК6, ВК6М, ВК8 и др. при подаче $S = 0,1 \dots 1,0$ мм/об; $v = 40 \dots 100$ м/мин и $t = 1 \dots 10$ мм. Возможно, также применение инструмента из быстрорежущих сталей Р9К5, Р6М5К5, Р9М4К8. Рекомендуемые геометрические параметры резцов из быстрорежущей стали: задний угол $\alpha = 10^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 15^\circ$, радиус при вершине $r = 1$ мм. Режимы резания при точении титана $v = 24 \dots 30$ м/мин; $S \leq 0,2$ мм, $t = 0,5 \dots 3$ мм.

Фрезерование титана и его сплавов затруднено из-за налипания титана на зубья фрезы и их выкрашивания. Для рабочих частей фрез применяют твердые сплавы ВК4, ВК6М, ВК8 и быстрорежущие стали Р9К5, Р9К10, Р8МЗК6С, Р6М5К5, Р9М4К8. При фрезеровании титана фрезами с пластинами из сплава ВК6М рекомендуют следующие режимы резания: $S = 0,08 \dots 0,12$ мм/зуб, $t = 2 \dots 4$ мм, $v = 80 \dots 100$ м/мин.

Сверление титана и его сплавов осуществляется с трудом из-за налипания стружки титана на рабочие поверхности инструмента и ее скопления в отводящих канавках сверла, что приводит к сильному повышению сопротивления резанию и быстрому износу сверл. Поэтому при сверлении глубоких отверстий необходимо периодически выводить инструмент для очистки его от стружки. Для сверления применяют инструмент из быстрорежущих сталей Р9К5, Р9К10, Р18Ф2, Р9Ф5, Р6М5К5, Р9М4К8, Р12Ф2К8М9 и твердого сплава ВК8. Рекомендуемые геометрические параметры сверл: $\gamma = 0 \dots 3^\circ$, $\alpha = 12 \dots 15^\circ$, $2\varphi = 120 \dots 130^\circ$, $2\varphi_0 = 70 \dots 80^\circ$, угол наклона спиральной канавки $25 \dots 30^\circ$.

Наиболее трудно обрабатываются резанием титановые полуфабрикаты и детали с грубой пластинчатой структурой. Такую структуру имеют, в частности, фасонные отливки. Кроме того, фасонное литье из титана и его сплавов имеет на поверхности корку, представленную газонасыщенным слоем, которая сильно изнашивает инструмент.

Для увеличения производительности механической обработки титановых сплавов резанием и повышения стойкости режущего инструмента применяют галлоидосодержащие смазочно-охлаждающие жидкости типа РЗ-СОЖ-8. Охлаждение обрабатываемых деталей осуществляют методом обильного полива. Использование галлоидоохлаждающих жидкостей при механической обработке приводит к образованию на поверхности титановых деталей солевой корки, которая при повышенных температурах и одновременном действии напряжений вызывает солевую коррозию. Поэтому детали, обрабатываемые с применением РЗ-СОЖ-8, после механической обработки подвергают облагораживающему травлению со снятием поверхностного слоя толщиной $0,005 \dots 0,010$ мм. При сборочных и механосборочных операциях не допускают применения РЗ – СОЖ-8.

Стойкость режущего инструмента при обработке деталей на станках с ЧПУ является основной характеристикой, обеспечивающей возможность его использования с приемлемой производительностью. Объем фрезерных работ при обработке самолётных титановых деталей составляет основную часть механической обработки. Основным типом инструментов, применяемых для этих целей, являются концевые фрезы, в меньшей степени используются сверла.

При фрезеровании исследовалась стойкость концевых фрез из быстрорежущих сталей P18, P6M5, P6M5K5, P12Ф5М и монокристаллических твердосплавных фрез на станках с ЧПУ моделей ФП-7М и ФП-9М [10]. Материал твердого сплава - ВК8, охлаждение - P3-СОЖ-8. Определялось также влияние электроэрозионного напыления карбида вольфрама на переднюю грань быстрорежущих фрез и термообработки обрабатываемого титанового сплава на стойкость инструмента. Обработке подвергались образцы и детали при встречном фрезеровании. Стойкость фрез определялась величиной допустимого износа по задней грани, критерий которого составлял $h_3 = 0,4$ мм.

Геометрические параметры следующие: упрочняющая фаска на передней грани шириной - 1 мм, с углом $-5-10^\circ$, задний угол до значения $\alpha = 12^\circ$ на ширине 1,5 мм и вспомогательный задний угол $\alpha_1 = 20^\circ$. Выполнялась также полировка стружечных канавок и доводка переходных радиусов по задней поверхности.

Основными параметрами режимов резания, определяющими стойкость инструмента, являются скорость резания и подача на зуб, в то время как толщина срезаемого слоя в пределах 6—20 мм практически не влияет на стойкость.

Экстремальные значения стойкости фрез из разных сталей соответствуют разным скоростям резания: для инструмента из стали P6M5 оптимальной является скорость резания 7—9 м/мин, для инструмента из стали P6M5K5 - 12 - 15 м/мин при подачах 0,05— 0,08 мм/зуб. Стойкость фрез при этом лежит в диапазоне 120—240 мин, что приемлемо для их практического использования на станках с ЧПУ.

Исследования фрезерования инструментом из стали P18 показали его непригодность для обработки на станках с ЧПУ. Фрезы из стали P12Ф5М обеспечивают возможность дальнейшего повышения производительности по сравнению с материалом P6M5K5 за счет увеличения скорости резания при сохранении 2—4-часовой стойкости. Таким образом, кобальтовые и ванадиевые быстрорежущие стали, позволяют решить проблему фрезерования деталей из сплава ВТ6ч.

Монокристаллические фрезы из твердого сплава ВК8 были опробованы при $v \leq 46$ м/мин и подачах $S_z \leq 0,04$ мм/зуб. При этом возрастает минутная подача с 45 до 60 мм/мин. Поэтому применение инструмента из сплава ВК8 позволяет увеличить производительность примерно на 30%. Однако в связи с дороговизной твердосплавного инструмента на станках с ЧПУ целесообразно использовать быстрорежущие стали, в большой степени легированные кобальтом и ванадием, что позволяет устранить этот разрыв в производительности.

Необходимо отметить, что инструмент из твердого сплава и быстрорежущей стали не дает дальнейшего увеличения производительности и качества обработанной поверхности. Использование современных методов модификации поверхности режущего инструмента позволяет увеличить ресурс режущего инструмента, повышает качество обработанной поверхности и износостойкость.

Покрытия на основе карбида вольфрама (WC) получены электроэрозионным напылением на фрезах из быстрорежущей стали P6M5. Электроэрозионное покрытие карбида вольфрама без последующего полирования не повышает стойкость фрез из стали P6M5, что объясняется повышенной адгезией стружки к покрытию. Полирование же покрытия по передней грани повысило стойкость этих фрез на режимах, оптимальных для фрез из стали P6M5K5, до значения стойкости последних.

Напыление карбида вольфрама на переднюю поверхность фрез из стали P6M5K5 и его полирование не повысили стойкость этих фрез, так как повышенная вязкость этой стали вызывает ее деформацию при резании, что приводит к растрескиванию покрытия. Отсюда следует ожидать, что нанесение покрытия на инструмент из кобальтованадиевых быстрорежущих сталей, имеющих большую твердость, позволит в значительной степени повысить производительность или, соответственно, стойкость.

Исследования процесса сверления проводилось для повышения стойкости сверл путем создания на поверхности инструмента разделительного слоя, восстанавливающегося в процессе резания, чтобы уменьшить адгезию обрабатываемого материала к поверхностям резания. Для этого был использован эффект избирательного переноса на поверхностях трения. В качестве рабочей среды применялась суспензия глицерина и порошковой окиси меди, которая в процессе резания может восстанавливаться до металлической меди, оседать на поверхности режущего инструмента и восстанавливаться по мере изнашивания. Сравнивалась стойкость инструмента из стали P6M5K5 при использовании в качестве СОЖ 5 % эмульсии, олеиновой кислоты и среды вышеприведенного состава при сверлении отверстий \varnothing 12 мм в плите толщиной 30 мм из стали на вертикально-сверлильном станке с механической подачей. В качестве критерия износа использовался момент прекращения процесса резания за счет износа по уголкам (но в отсутствие приваривания стружки). При скорости резания ~ 10 м/мин и подаче 0,14 мм/об стойкость сверл при охлаждении эмульсией составила 14 мин (12 отверстий, длина сверления 360 мм), при использовании олеиновой кислоты — 31 мин (26 отверстий, длина сверления 780 мм), глицерина + CuO — 170 мин (144 отверстия, длина сверления 4320 мм). При скорости резания ~ 13 м/мин вышеназванной подаче, но при улучшении геометрии режущей части сверла его стойкость при охлаждении эмульсией составило от 30 до 45 мин, при использовании глицерина с CuO ~ 100 мин.) Однако условия работы при $v = 13$ м/мин при использовании в качестве СОЖ олеиновой кислоты или глицерина неудовлетворительны вследствие испарения СОЖ при высоких температурах и выделения паров. При скорости резания $v \sim 10$ м/мин применение глицерина с CuO позво-

лило повысить стойкость сверл в 12 раз по сравнению с использованием эмульсии и в 5,5 раз по сравнению с применением олеиновой кислоты.

При микрорентгеноспектральном анализе было установлено наличие пленки меди на передней и задней поверхностях сверла, а также следы титана. Очевидно, что в процессе сверления имеет место избирательный перенос медной пленки на рабочие поверхности инструмента. Избирательный перенос, создающий разделительные пленки, позволяет повысить стойкость сверл до 1,5—2,5 ч при сверлении сплава ВТ6ч. При этом необходима местная вытяжка для удаления образующихся при резании испарений или разработка специальной геометрии инструмента, например, подточка перемычки и ленточек для снижения трения и тепловыделения в процессе резания.

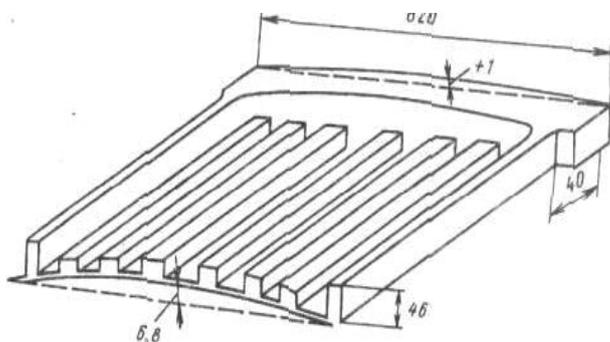


Рис. 3. Коробление панели, после ее изготовления

3.7. ПРИЧИНЫ КОРОБЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОВАНО-КАТАНЫХ ПЛИТ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В процессе изготовления деталей типа панелей из плит титанового сплава ВТ6ч путем фрезерования происходит поводка деталей в сторону внутренней оребренной поверхности, т.е. в ту сторону, с которой съем металла, является наибольшим. Плиты поставляются отожженными при температуре 800°C, 1 ч с охлаждением на воздухе, что подразумевает снятие остаточных напряжений. Однако деформирование деталей после их изготовления указывает на хотя бы частичное сохранение остаточных внутренних напряжений.

Из плиты толщиной 50 мм была изготовлена панель, эскиз которой, размеры сечения и поводки показаны на рис. 3. Панель изогнулась в сторону ребер на 7 мм. Деформация детали привела к изгибу прямоугольного бруса сечением 46x40 мм на 1 мм на базе 700 мм. Расчетом определено, что остаточные напряжения в при поверхностных слоях плиты являются растягивающими (до 200 МПа). Таким образом:

1) причиной коробления деталей является перераспределение собственных напряжений в плитах после удаления припусков механической обработкой;

2) напряжения от фрезерования, вызванные процессом резания, практически не вызывают коробления деталей;

3) остаточные напряжения в поперечном направлении в плитах из сплава ВТ6ч изменяются в широких пределах: от 0 до 200 МПа сжатия и 270 МПа растяжения. В поверхностных слоях плит преобладают остаточные напряжения растяжения;

4) отжиг плит при 800 °С, 1 ч с охлаждением на воздухе не гарантирует снятия остаточных напряжений. Для этого следует увеличить время выдержки и регламентировать условия охлаждения, которые должны быть одинаковыми для обеих плоскостей плиты.

Одним из методов борьбы с остаточными напряжениями является вибростабилизация полуфабрикатов. Сущность этого метода заключается в том, что перед механической обработкой на панель накладываются с помощью вибратора высокочастотные нагрузки с частотой от 50 до 100 Гц, которые приводят к выравниванию внутренних остаточных напряжений в плите. Использование этого метода позволяет в 2—3 раза снизить коробление панелей в процессе их механической обработки. Небольшие поковки, которые все же остаются после механической обработки, устраняются путем правки в холодном состоянии или с помощью термофиксации. Места правки контролируются с помощью лупы 4—7-кратного увеличения, капиллярным и рентгеновскими методами.

3.8. ЗАЧИСТКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

Из титановых сплавов изготавливаются силовые конструкции планера (панели, пояса и стенки лонжеронов, нервюры и др.), а также детали типа кронштейнов, качалок и т.д. Заготовками для этих целей служат плиты из сплавов ВТ6ч и ВТ20, штамповки из сплавов ВТ6ч и ВТ22, литье из сплава ВТ5Л.

В связи с необходимостью обеспечения высокого сопротивления усталости, надежности и долговечности поверхности указанных деталей после механической обработки должны иметь шероховатость $R_z = 20$ и $R_a = 2,5$. После фрезерования, которое является для этих деталей основным видом механической обработки, шероховатость поверхности на плоскостях соответствует $R_z = 20$, а в замкнутых полостях, переходах толщин и других местах концентрации напряжений она повышена до $R_z = 40$.

Для обеспечения требуемой шероховатости необходима зачистка этих зон. Ручная обработка весьма трудоемка, может ухудшить ресурсные характеристики деталей, ухудшает условия труда, является пожароопасной. Альтернативой ручной зачистке является обработка свободным абразивом при использовании виброабразивной обработки и пульсирующего шлифования. В

качестве абразива могут быть использованы различные материалы: дробленый плавленный нормальный электрокорунд, естественные и искусственные кварциты, порошковые отходы изношенных шлифовальных кругов, искусственные формовочные абразивные гранулы и т.д. Предпочтительный размер частиц составляет 5—20 мм. Виброабразивная обработка обеспечивает снижение шероховатости с величины $R_z = 40$ до $R_z = 2,5$ при двухкоординатной вибрации с частотой 20—30 Гц, амплитудой 2—3,5 мм, временем обработки 90—150 мин при загрузке контейнера с абразивом деталями "внавал". При обработке деталей с закреплением время обработки может быть снижено вдвое.

Обработка пульсирующим шлифованием используется для зачистки крупногабаритных деталей таких, например, как стенка лонжерона из сплава ВТ20. Для этой цели используется установка типа ПУ-7, позволяющая обрабатывать детали длиной до 9 м при ширине до 1600 мм. Установка состоит из станины, на которой установлена подвижная рама, приводимая в движение приводом с кривошипно-шатунным механизмом. Вдоль рамы перемещается бункер с абразивом и эксгаустерное устройство. В раму устанавливается деталь (или детали), механически высыпается абразив, в процессе обработки подается охлаждающая жидкость. При движении рамы с закрепленными в ней деталями абразив скользит вдоль поверхностей деталей, зачищая ее поверхности, в том числе и в закрытых полостях. Для снижения шероховатости с величины $R_z = 40$ до $R_z = 2,5$ на открытых поверхностях и поверхностях, параллельных ходу рамы, и до величины $R_z = 20$ в замкнутых полостях и поверхностях, перпендикулярных ходу рамы, работа проводится на следующих режимах:

длина хода рамы	50 мм
число двойных ходов рамы	300 1/мин
время обработки	120—150 мин

В результате перехода с ручной на механическую зачистку свободным абразивом трудоемкость обработки снижается в 2—5 раз, ликвидируется ручной труд при зачистке, устраняется опасность повреждения поверхностей детали, ибо при обработке не возникает повышенных температур из-за отсутствия жесткого прижима обрабатывающей среды к обрабатываемой поверхности.

ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ В СМЕШАННЫХ ПАКЕТАХ

4.1. РАЗДЕЛКА ОТВЕРСТИЙ В СМЕШАННЫХ ПАКЕТАХ И ОТВЕРСТИЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ПОДХОДЕ

При обработке отверстий под болтовой крепеж в соединениях, представляющих собой пакеты из деталей, изготовленных из титановых и алюминиевых сплавов, вследствие различного упругого возврата этих материалов затруднительно получить точность по седьмому качеству по всей толщине пакета. Обычно разница диаметров отверстий в составляющих пакет деталей составляет 1-2 качества. Для разделки таких отверстий развертыванием с целью получения точности по седьмому качеству применяют развертки которым является инструмент с одним режущим лезвием. Схема резания однолезвийной разверткой позволяет уменьшить нагартовку поверхностного слоя. Схемы резания одно- и многолезвийной развертками представлены на рис. 4.

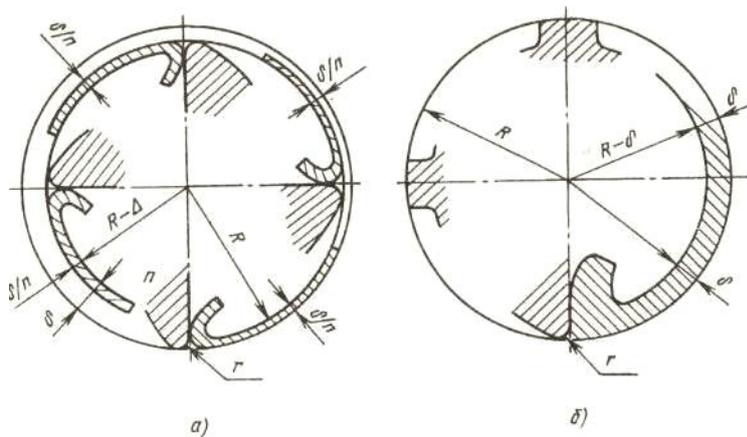


Рис. 4. Схемы резания при развертывании: а - многозубной разверткой; б - однолезвийной разверткой.

При обработке многолезвийными развертками каждый зуб срезает припуск, равный отношению его общей величины к числу зубьев. Первый зуб срезает часть припуска с поверхностного слоя, оставшегося после предварительной обработки, и производит нагартовку обработанной поверхности. Каждый последующий зуб, снимая свою часть припуска, работает по уже нагартованному материалу, что увеличивает усилие резания, которое возрастает вследствие одновременной работы всех зубьев развертки.

Режущая кромка каждого зуба в процессе работы притупляется, и это притупление сопоставимо с величиной удаляемого одним зубом припуска, которое в этих условиях осуществляется не срезанием, а отдавливанием его от основной массы материала. Это вызывает увеличение пластической деформации стружки и нагартовки обработанной поверхности, что приводит к росту толщины пластически деформированного слоя и, как следствие, к уве-

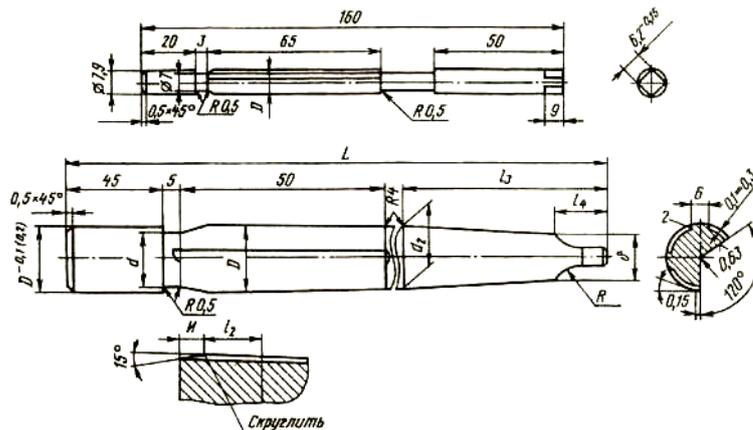


Рис. 5. Однолезвийные развертки.

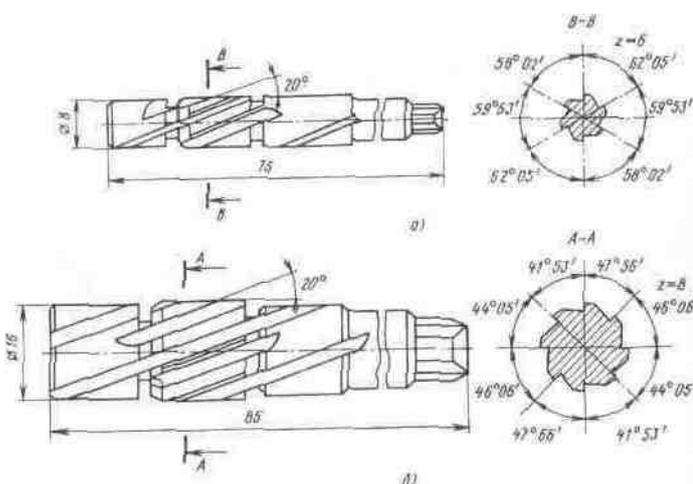
личению разности упругого возврата в разнородных материалах. При работе однолезвийной разверткой ее зуб срезает сразу весь припуск и работает по неупрочненному материалу. Это снижает усилие резания и уменьшает нагартовку поверхностного слоя обработанной поверхности, что в свою очередь снижает в ней упругопластические деформации по интенсивности и глубине, нивелируя разность упругого возврата материалов разной прочности,

На рис. 5 показан эскиз однолезвийной развертки. Однако в ней трудно выполнить заднюю часть, что может привести к нестабильности ее работы на выходе. В работе [10] проведено опробование для разделки отверстий в смешанных пакетах спиральных разверток с углом подъема 6° . Но этот угол подъема оказался недостаточен для указанной цели, увеличение же его приводит к самозатягиванию инструмента. Поэтому для этой цели были применены развертки с углом подъема спирали 20° с левым направлением. Такие развертки показаны на рис. 6. Она позволяет дополнительно снизить нагартовку поверхностного слоя за счет того, что развертка не затягивается обрабатываемым материалом, а стружка выводится в необработанную часть отверстия.

Опробование этих разверток показало, что они обеспечивают точность отверстий в смешанных пакетах по седьмому качеству: разница в диаметрах отверстий 8-10 мм в деталях из разных материалов не превышала 5 мкм, в отверстиях $\varnothing 16$ мм - 10 мкм.

Развертки были применены для предварительной обработки отверстий. Получение точности по седьмому качеству обуславливается также следующими факторами:

- общая толщина пакета должна быть не менее 8 мм;
- наименьший диаметр отверстия — 8 мм;
- переднюю направляющую часть следует располагать не далее чем в двух миллиметрах от начала режущей части;
- заходная часть — как для машинной обработки, привод — от тихоходной дрели;
- СОЖ — олеиновая кислота;
- припуск — 0,1 мм на диаметр для отверстий $\varnothing 8$ —10 мм и 0,05 мм для отверстия $\varnothing 12$ мм;



37
Рис.6. Развертки с левой, крутой спиралью: а- D - 8 мм; б - D = 16 мм

развертывание может осуществляться как со стороны алюминиевой, так и титановой частей пакета.

При развертывании отверстий большого диаметра при отсутствии подхода для размещения дрели необходимо ручное развертывание, что для титановых и смешанных пакетов возможно только однолезвийными развертками. Для подтверждения этого положения проводилось исследование по разделке отверстий \varnothing 24 мм в пакете из сплава ВТ6ч и в таком же трехслойном пакете из сплавов ВТ и АК4-1Т1. Под разделку оставлялись припуски 0,07—0,2 мм на диаметр. Для сравнения отверстия обрабатывались многолезвийными прямозубной разверткой и специальной разверткой со спиральным зубом.

При использовании в качестве СОЖ масла "Индустриальное 20" или олеиновой кислоты развертывание прямозубной разверткой создает момент резания 10 кГм. Обработку производили двое рабочих воротком с удлиненными ручками с двух сторон. Длина рычага составляла \sim 800 мм. Время обработки одного отверстия - 15 мин, точность отверстия в однородном и смешанном пакетах — девятый квалитет. При обработке спиральной разверткой момент резания снизился до 5 кГм при получении той же точности.

Обработка отверстий однолезвийной разверткой при использовании в качестве СОЖ масла "Индустриальное 20" снизила момент резания до 3 кГм при точности отверстия — девятый квалитет, а при использовании олеиновой кислоты момент резания снизился до 1,5—2 кГм при точности отверстий в однородном и смешанном пакетах по седьмому квалитету. Обработка производилась одним рабочим односторонним воротком с храповиком.

Дальнейшее исследование ручного развертывания отверстий \varnothing 16—20 мм в смешанном титаноалюминиевом пакете толщиной 30—45 мм показало, что разбивка отверстий в алюминиевой части пакета не превышала 0,01 мм от диаметра развертки. Разница диаметров отверстий в титановой и алюминиевой частях пакета также не превышала 0,01 мм. При этом однолезвийные развертки позволяют увеличить припуск под окончательную обработку до 0,15—0,2 мм на диаметр.

4.2. РАСКАТЫВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ В СМЕШАННЫХ ПАКЕТАХ, ОБКАТЫВАНИЕ И РАСКАТЫВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Раскатывание отверстий жесткими регулируемыми раскатниками, проводимое как упрочнение ППД, в смешанных пакетах "алюминий — титан" не обеспечивает точность седьмого квалитета в связи с различной величиной упругого возврата деталей из алюминиевых и титановых сплавов.

На рис. 7 показано влияние натяга на увеличение диаметра отверстий в пакете из алюминиевого сплава АК4-1Т1 и титанового сплава ВТ6ч. Видно, что для обеспечения одинакового увеличения диаметра отверстия в деталях из указанных сплавов натяг при раскатывании детали из титанового сплава должен быть примерно вдвое больше, чем натяг при раскатывании детали из

алюминиевого сплава. При работе жестким раскатником создается одинаковый натяг по всей толщине наката, что приводит к разности диаметров отверстий в пределах 0,01-0,02 мм, что может обеспечить точность только по девятому качеству.

При раскатывании отверстий для обеспечения в таком смешанном пакете необходимого натяга в каждой детали пакета разработан дифференциальный раскатник, конструктивная схема которого представлена на рис. 8. Принцип действия такого раскатника заключается в том, что при изменении усилия обработки сепаратор 4 с роликами 3 перемещается под действием нагружающего устройства вдоль штока 2; при этом ролики изменяют свое положение по диаметру, так как они перемещаются по конической поверхности штока. Раскатник настраивается по величине натяга, необходимого для обработки отверстия в детали из алюминиевого сплава, что обеспечивается

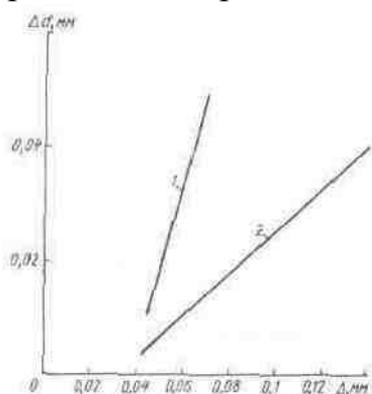


Рис. 7. Влияние натяга (Δ) при раскатывании на увеличение диаметра отверстий:
1 — в сплаве АК4-1Т1; 2 — в сплаве ВТ6ч

положением правого упора 9 при прижатом к нему кольцу 8. Усилие пружины 16 по указателю 18 устанавливается гайкой 10 по шкале 20 таким образом, чтобы оно превышало усилие, возникающее при раскатывании отверстия в детали из алюминиевого сплава, но было бы меньше усилия, возникающего при раскатывании отверстия в детали из титанового сплава.

Зазор между кольцом 8 и упором 6 устанавливается таким образом, чтобы при перемещении до упора 6 сепаратора 4 с роликами 3 относительно штока 2 было обеспечено равенство диаметров отверстия по всей толщине пакета.

В процессе обработки при упрочнении отверстия из алюминиевого сплава все детали раскатника сохраняют первоначальное положение, что со-

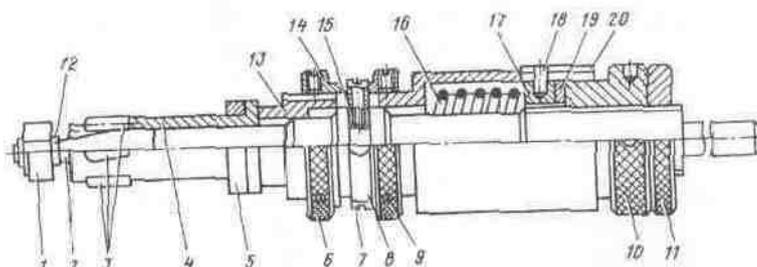


Рис. 8. Конструктивная схема дифференциального раскатника: 1 — направляющая; 2 — шток; 3 — ролик; 4 — сепаратор; 5 — амортизатор; 6, 9 — упоры; 7 — винт; 8 — кольцо; 10 — гайка; 11 — контргайка; 12 — кольцо пружинное; 13 — корпус; 14 — винт стопорный; 15 — вкладыш; 16 — пружина; 17 — кольцо; 18 — указатель; 19 — кольцо; 20 — шкала.

здает минимальный натяг, оптимальный для упрочнения материала и для раздачи диаметра отверстия. Когда начинается обработка отверстия в титановом сплаве, усилие раскатывания возрастает, сепаратор 4 с роликами 3 сжимает пружину 16 до положения касания кольца 8 к упору 6. При этом ролики 3 расходятся по конусу штока 2 и повышают натяг, необходимый для упрочнения материала детали из титанового сплава, а также для увеличения диаметра отверстия до значения, равного диаметру отверстия в детали из алюминиевого сплава.

На ММЗ "Опыт" им. А.Н. Туполева отработана технология раскатывания отверстий в смешанных пакетах для диаметров 8—24 мм. В качестве СОЖ использовалась олеиновая кислота, приводом для раскатника служила малооборотная дрель с частотой вращения 150—400 об/мин. Припуск под раскатывание составлял ~0,02 мм на диаметр. Натяги под раскатывание отверстий в детали из алюминиевого сплава составили для Ø 8—10 мм 0,04—0,05 мм, для Ø 12—16 мм 0,05-0,06 мм, для Ø 18—24 мм 0,06-0,07 мм. Натяги для раскатывания детали из титанового сплава составляют удвоенную к указанной величину. Толщина пакета должна быть не менее 8 мм для отверстий Ø 8, 10 мм и не менее 10 мм для всех отверстий большего диаметра. Раскатывание производится только со стороны детали из алюминиевого сплава за один проход. При этом увеличение диаметра отверстия после раскатки составляет 0,02 мм. Раскатывание производится, как правило, в пакете как окончательная операция обработки отверстий, но может производиться и отдельно в деталях пакета, если отверстия под раскатывание разделаны совместно (на съемных деталях).

В деталях из сплава ВТ6с имеются отверстия и наружные цилиндрические поверхности Ø 500—800 мм, выполняемые по седьмому качеству точности и с шероховатостью $R_z = 1,25$. Эти поверхности нежелательно обрабатывать шлифованием и необходимо подвергать упрочнению ППД. Были отработаны режимы и условия упрочнения и оснастка для его выполнения. Обработка производилась на натуральных образцах, упрочнение выполнялось на токарном станке. Так как жесткие раскатники такого диаметра выполнить затруднительно, была отработана конструкция раскатника при работе одиночным роликом. Раскатывание внутренней поверхности одиночным роликом с профильным радиусом 3 мм при усилии обкатывания 1500 Н снизило параметр шероховатости поверхности с $R_z = 20$ до $R_z = 2,5$. Расхождение и схождение колец после обработки, являющейся мерой интенсивности упрочнения, составило 1,5 мм при упрочнении внутренней поверхности и 2 мм при упрочнении наружной поверхности. При усилии обкатывания 3000 Н шероховатость поверхности снизилась до значения $R_z = 1,25$, а расхождение и схождение контрольных колец составило 3,1 мм при упрочнении внутренней поверхности и 4,4 мм при упрочнении наружной, что указывает на достаточную интенсивность упрочнения. При этом размер отверстия увеличился на 0,05—0,1 мм, а наружный диаметр уменьшился на такую же величину. Отсюда принятые режимы и условия упрочнения следующие: усилие — 3000 Н;

подача — 0,1 мм/об; скорость — 35—50 м/мин; диаметр ролика — 130—170 мм; профильный радиус ролика — 3 мм.

Такие поверхности в производстве упрочнялись на горизонтально-расточных или специальных станках. Для упрочнения на горизонтально-расточном станке применялось обкатное устройство; усилие упрочнения его контролировалось сигнальными лампочками (2 шт.), одновременное горение которых показывало обеспечение требуемого усилия упрочнения.

ГЛАВА 5. НАКАТЫВАНИЕ РЕЗЬБЫ НА БОЛТАХ ИЗ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

По сравнению с болтами диаметром 16 мм, изготавливаемыми по отраслевым стандартам из сплава ВТ16, болты большего диаметра изготавливаются из прутка с меньшей пластичностью, с более крупнозернистой структурой и, следовательно, они будут недостаточно надежны в конструкции, если резьбу получать накаткой до окончательной термообработки или нарезкой. Поэтому была проведена отработка технологии накатывания резьбы после упрочняющей термообработки из прутков сплавов ВТ6ч и ВТ 16.

Отработка технологии накатывания резьбы производилась на болтах и шпильках с резьбой 18x1,5; 24x1,5 и 36x2 мм. Выявлены следующие особенности технологии, необходимые для получения качественной резьбы:

скорость накатывания должна выбираться в зависимости от диаметра резьбы: чем больше диаметр, тем выше должна быть скорость (для \varnothing 18—20 мм v - 10 м/мин; для \varnothing 22—30 мм $v \sim 12$ м/мин; для $\varnothing > 30$ мм $v \sim 13$ —14 м/мин);

время накатывания должно быть минимальным для обеспечения выкатывания полного профиля во избежание отслаивания материала;

накатывание должно осуществляться за 3—8 оборотов болта;

усилие накатывания резьбы с шагом 1,5 зависит от диаметра и колеблется для сплава ВТ6ч от 120 кН (для резьбы 18x1,5 мм) до 160 кН (для резьбы 24x1,5 мм); накатывание резьбы на прутках из сплава ВТ16 требует усилий на 15—20 кН больше;

резьба 36x2 мм накатывается с усилием 220—240 кН;

подачу прокатных роликов следует уменьшить до минимального значения, обеспечивающего выкатывание резьбы за время контакта с заготовкой.

Соппротивление усталости материала с резьбой исследовалось испытанием резьбовых шпилек 18x1,5 мм при нулевом цикле нагружения. Определялось влияние материала шпилек, способа получения резьбы (нарезание или накатывание), влияние упрочнения нарезанной резьбы микрошариками. Результаты испытаний показали, что накатывание резьбы повышает усталостную долговечность в 10 раз и более по сравнению с ее нарезанием. Упрочнение нарезанной резьбы микрошариками малоэффективно; оно повышает дол-

говечность примерно в 1,5 раза. Долговечность шпилек с накатанной резьбой из обоих сплавов примерно одинакова на высоких и низких уровнях нагружения. На среднем уровне нагружения долговечность шпилек из сплава ВТ6ч примерно в 1,5 раза превышает долговечность шпилек из сплава ВТ16.

Анализ усталостных изломов показал, что при получении резьбы нарезанием разрушение начинается с поверхности, а в случае накатывания — под ней. В последнем случае трещина развивается в две стадии: сначала она замкнута в небольшой зоне, фронт развития трещины вытянут к центру сечения и ограничен по периметру резьбы, далее трещина развивается от большого количества очагов, расположенных под поверхностью, и от первичного очага к центру сечения. Повышение долговечности в случае получения резьбы накатыванием объясняется упрочнением поверхностного слоя, которое переводит очаг усталостного разрушения под него.

Для крупногабаритных болтов могут быть использованы оба изученных материала при получении резьбы накатыванием. Они обеспечивают высокое сопротивление усталости, но сплав ВТ6ч для этой цели более предпочтителен, так как его состав и свойства более стабильны, а технологичность выше.

ГЛАВА 6. ДРОБЕУДАРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Сопротивление усталости титановых сплавов существенно зависит от шероховатости поверхности. На шероховатость поверхности, а следовательно, и на сопротивление усталости можно существенно влиять дробеударной обработкой.

Наиболее детально влияние шероховатости на сопротивление усталости было изучено на примере сплава ВТ6ч. Исследования были проведены на образцах, изготовленных из плит. Неровности были ориентированы перпендикулярно оси образцов. Все образцы одной партии обрабатывались одним и тем же инструментом с твердосплавной режущей частью без ее переточки. Изменение высоты неровностей достигалось изменением подачи. Для исключения влияния напряженного состояния все образцы подвергались $(\alpha+\beta)$ -отжигу в вакууме. Условия нагружения при отнулевом изгибе $\sigma_{\max} = 750$ МПа, при повторном растяжении — $\sigma_{\max} = 800$ МПа, $R = 0,1$. Увеличение высоты неровностей с 7 до 40 мкм вызывает снижение долговечности при повторном изгибе ~ в 2 раза, при повторном растяжении ~ в 1,5 раза. Следовательно, повышение высоты неровностей примерно в 6 раз, увеличивающее теоретический коэффициент концентрации напряжений почти в 2 раза, изменяет эффективный коэффициент концентрации напряжений при изгибе в 1,2 раза, при растяжении ~ в 1,1 раза, что указывает на небольшую чувствительность сплава ВТ6ч к шероховатости поверхности.

Дробеударное упрочнение проводилось стальной дробью $\varnothing 0,8-1,0$ мм при давлении воздуха в сопловой головке 0,2—0,25 МПа (скорость дроби -18 м/с, скорость перемещения сопловой головки 200-300 мм/мин).

Шероховатость образцов после их упрочнения не зависит от исходной высоты неровностей, если она менее 20 мкм и соответствует значению $R_z = 10...20$ мкм. При этом полностью или частично образуется новый профиль. При более высокой исходной высоте неровностей шероховатость поверхности после упрочнения дробью изменяется незначительно.

Сопrotивление усталости упрочненных дробью образцов показано на рис. 10.16. Эффективность упрочнения при изгибе существенно выше, чем при растяжении; в обоих случаях она зависит от величины исходной шероховатости. При этом для конкретного режима упрочнения как при изгибе, так и при растяжении обнаруживается оптимальное значение шероховатости, при котором усталостная долговечность является наибольшей. Это значение соответствует при растяжении $R_z = 7...12$ мкм, при изгибе - $R_z = 10...20$ мкм.

Наибольшее повышение долговечности при изгибе достигает 30-кратного значения, наименьшее при исходной шероховатости $R_z = 20...40$ мкм - 8-кратного. При растяжении наибольшее повышение долговечности достигает 8-кратного значения, наименьшее при исходной шероховатости $R_z = 20...40$ мкм - двукратного.

При введении дробеударного упрочнения снижается рассеяние результатов усталостной долговечности. При растяжении образцов без упрочнения рассеяние долговечности, определяемое отношением N_{max}/N_{min} составляло 20 и более. После упрочнения оно не превышало 8, и только после упрочнения образцов с исходной шероховатостью $R_z = 20...40$ достигало 11.

При возможности увеличения интенсивности упрочнения, формирующего новый профиль, оптимальная исходная высота неровностей будет изменяться в сторону повышения.

Проведенные исследования позволили назначить исходную шероховатость поверхности $R_z = 20$, которую в основном можно получить механической лезвийной обработкой без зачистки, что улучшает качество деталей, снижает трудоемкость и облегчает условия труда. Эффективность дробеударной обработки, проявляющаяся в снижении рассеяния усталостной долговечности, обеспечивает не только повышение срока службы конструкции, но и рост ее надежности или позволяет увеличить нагруженность ее в эксплуатации.

6.1. Дробеударное упрочнение сварного соединения из титанового сплава

Сварным соединениям из титановых сплавов свойственны, как соединениям из других металлов, внутренние, поверхностные и подповерхностные дефекты, в основном в виде пор. Дробеударное упрочнение сварных соединений будет эффективным, когда оно нейтрализует влияние дефектов, снижающих сопротивление усталости.

Для оценки этой возможности было исследовано сопротивление усталости сварного соединения из титанового сплава ВТ6ч, выполненного ЭЛС и АрДЭС в щелевую разделку плит толщиной 20 и 60 мм.

Из этих плит вырезались образцы для усталостных испытаний. Сравнивая долговечность малых и масштабных образцов, можно определить эффективность дробеударного упрочнения и понять механизм усталостного повреждения и упрочнения с учетом масштабного фактора и исходной структуры. Для сравнения сопротивление усталости сварных соединений и основного материала из тех же полуфабрикатов изготавливали цельные образцы, не отличающиеся геометрией сечений от сварных.

Малые образцы испытывали при повторном растяжении с $\sigma_{\max} = 600$ МПа, $R = 0,1$ и частотой 40 Гц, масштабные образцы - при отнулевом растяжении с $\sigma_{\max} = 700$ МПа и частотой 3—4 Гц. Малые образцы и часть масштабных образцов упрочняли стальной дробью диаметром 0,8—1,0 мм и интенсивностью 1,2 (прогиб контрольных образцов 1,2 мм на базе 1000 мм). Другую часть масштабных образцов упрочняли той же дробью, но при интенсивности 3,0 (прогиб 3 мм на базе 100 мм). Третью часть таких образцов упрочняли дробью диаметром 2,5 мм пневмодинамическим способом с интенсивностью 1,2.

Долговечность монолитных образцов, вырезанных из плит толщиной 60 мм, составляет $1,1 \cdot 10^5$ циклов и значительно уступает долговечности таких же образцов, вырезанных из плиты толщиной 20 мм. Средняя долговечность сварных образцов составляет $(0,7 \dots 0,9) \cdot 10^5$ циклов независимо от места их вырезки по толщине плиты. Рассеяние результатов (отношение N_{\max}/N_{\min}) достигает 30-кратного значения. Упрочнение дробью всех малых образцов повышает среднее значение долговечности в 4—5 раз при снижении рассеяния до 15 крат. Однако минимальные значения долговечности до и после упрочнения отличаются всего в 2 раза.

Исходная долговечность масштабных образцов показала близкую к свойствам малых образцов величину ($0,7 \cdot 10^5$ цикл.) при испытании на этом же уровне нагружения ($\sigma_{\max} = 600$ МПа). Однако после упрочнения монолитные образцы не разрушились после $5 \cdot 10^5$ цикл. Для их разрушения пришлось повысить уровень напряжений до $\sigma_{\max} = 700$ МПа. Долговечность монолитных образцов повысилась в 4—5 раз независимо от интенсивности обработки и размера дроби (с $3 \cdot 10^4$ до $3 \dots 17 \cdot 10^4$ цикл.). Долговечность сварных образцов оказалась в полтора раза ниже, чем для монолитных. Механическая обработка зоны сварки после отжига повысила долговечность в 2,5 раза (до $5 \cdot 10^4$ цикл.), что выше долговечности основного отожженного материала.

Упрочнение дробью $\varnothing 0,8$ —1,0 мм с интенсивностью 3,0 повысило долговечность до $14 \cdot 10^4$ циклов без выпадов, с интенсивностью 1,2 — до $17 \cdot 10^4$ цикл., но с минимальным ее значением $6 \cdot 10^4$ цикл. с разрушением от

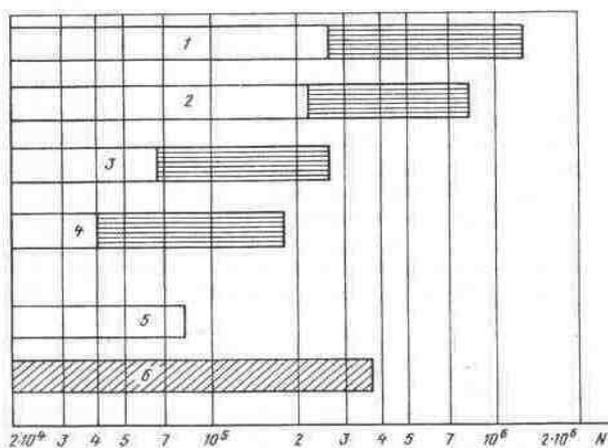


Рис. 9. Влияние сварочных пор на усталостную долговечность малых сварных образцов: 1 - бездефектные структуры; 2 - внутренние поры; 3 - подповерхностные поры; 4 - поверхностные поры; 5 - без упрочнения; 6 - с упрочнением

подповерхностной поры. Упрочнение крупной дробью оказалось недостаточно эффективным (повышение долговечности составило -1,5 раза). Из этих результатов следует вывод, что основной материал можно упрочнять дробью при любых из исследованных условий, а сварное соединение — только мелкой дробью с высокой интенсивностью обработки.

Поверхностные поры снижают долговечность в 5—15 раз по сравнению с бездефектной структурой, подповерхностные поры — в меньшей степени (рис.9). Влияние сварочных пор на усталостную долговечность малых сварных образцов иллюстрируют следующие результаты испытаний:

<i>Характеристика образцов</i>	<i>Число циклов до разрушения</i>
бездефектные структуры	1,5-10 ⁶
внутренние поры	0,8- 10 ⁶
подповерхностные поры.....	0,25- 10 ⁵
поверхностные поры.....	1,8-10 ⁵
без упрочнения.....	0,8- 10 ⁵
с упрочнением.....	3,6-10 ⁵

Масштабные образцы после упрочнения с высокой интенсивностью обработки разрушались чаще всего вне зоны сварки. Имелись отдельные случаи разрушения от внутренней поры.

Эффективность упрочнения высокой интенсивности в зоне сварки объясняется подавлением влияния концентрации напряжений от подповерхност-

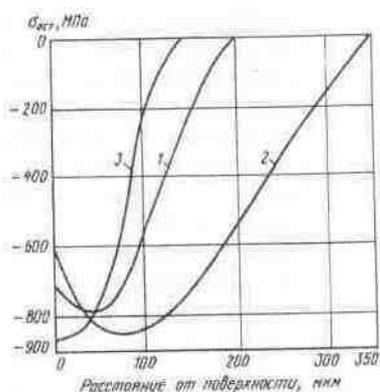


Рис. 10. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое после упрочнения дробью масштабных образцов: 1- Ø 0,8 мм, интенсивность 1,2; 2 — Ø 0,8 мм, интенсивность 3,0; 3 — Ø 2,5 мм, интенсивность 1,2

ных пор остаточным сжатием. На рис. 10 представлены эпюры дробеударного упрочнения. Повышение интенсивности упрочнения с 1,2 до 3,0 увеличивает глубину распространения остаточного сжатия с 0,2 до 0,35 мм и примерно вдвое — площадь эпюры.

6.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ДРОБЬЮ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С АЛЬФИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

При загазованном хрупком поверхностном слое целью дробеударного упрочнения является торможение возникающих или имеющихся поверхностных трещин для того, чтобы полностью устранить их влияние. При этом од-

новременно удается повысить сопротивление усталости по сравнению со свойствами металла в исходном состоянии без такого слоя.

Схема торможения трещины заключается в том, что трещина, попадая в область значительных остаточных напряжений сжатия, останавливается в ней в связи с малостью параметра интенсивности напряжений, зависящего как от напряжений, возникающих от внешних нагрузок, так и от остаточного сжатия поверхностного слоя.

Образцы для проведения испытаний были приведены на рис. 4.14. Альфирование на круглых образцах с шероховатостью поверхности $R_z = 6...10$ мм создавалось отжигом на воздухе при температуре $650\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин (слой толщиной 15 мкм, превышение микротвердости 75 %) и при температуре $750\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин (слой толщиной 45 мкм, превышение микротвердости 95%). Эти образцы испытывались при повторном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ и максимальном напряжении $\sigma_{\max} = 460$ МПа.

Альфирование снижает долговечность более чем в 10 раз уже при превышении микротвердости на 25 %, а дробеударная обработка полностью ее восстанавливает. Ее эффективность при поверхностном загазованном слое на образцах существенно выше, чем без него; при такой же шероховатости поверхности долговечность после дробеударного упрочнения повысилась в 2,5 раза (но при более высоком уровне нагружения). Эффективность упрочнения дробью тем выше, чем оно интенсивнее, поскольку чем больше подповерхностные остаточные напряжения сжатия, тем сильнее торможение поверхностных трещин в альфированном слое, которые образуются при первых циклах нагружения или уже существуют в слое. При повреждении поверхностного слоя в виде альфирования ограничения по режимам упрочнения отсутствуют. Оптимальным можно считать режим, когда очаг усталостного разрушения будет находиться вне зоны нахождения дефектов. Это, как правило, режим максимальной интенсивности при обработке дробью $\varnothing 0,8-1,0$ мм со скоростью ~ 30 м/с и сплошностью 95—100 %. Такие же выводы можно распространить и на упрочнение поверхности, на которой присутствуют прижоги от шлифования или зачистки. Ограничительным условием в этом случае является шероховатость поверхности после упрочнения.

В заключение следует отметить, что повышение дробеструйной обработкой сопротивления усталости титановых сплавов с альфированным слоем не является единственным способом устранения нежелательных последствий газонасыщения. В ряде работ показано, что частичное снятие альфированного слоя химическим травлением приводит к повышению сопротивления усталости по сравнению даже с образцами с полностью снятым альфированным слоем.

6.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ФАСОННОГО ЛИТЬЯ ИЗ СПЛАВА ВТ5Л И ШТАМПОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ22

Отливки из сплава ВТ5Л и штамповки из сплава ВТ22, как правило, служат силовыми узлами крепления (фитинги, кронштейны), испытывающими значительные повторяющиеся нагрузки различной частоты. Большинство поверхностей деталей механической обработке не подвергаются; обрабатываются только привалочные плоскости, отверстия и плоскости ушковых соединений.

В связи с этим была оценена оптимальная технология обработки и упрочнения деталей, обеспечивающая их наилучшую работоспособность при повторных нагрузках. Исследование проводилось на образцах, эффективность технологии обработки которых проверялась испытанием на повторные нагрузки. Перед упрочнением определялось состояние поверхности деталей. Упрочнение ППД выполнялось методами виброударной и виброабразивной обработки. Критерием оптимальности для литья являлась долговечность при отнулевом растяжении с $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_B$, а также при чистом изгибе с $\sigma_a = 0,6\sigma_B$. Образцы для испытания вырезались из качественных отливок. Вибрационная обработка производилась на двухкоординатных виброустановках по схеме свободного вращения.

При отсутствии механической обработки травление корки и вакуумный отжиг не влияют на малоцикловую выносливость, в то время как механическая обработка, удаляющая корку, повышает долговечность приблизительно в 2 раза. Виброшлифование по корке повышает долговечность приблизительно в 2 раза по сравнению с исходной величиной, что компенсирует снижение долговечности по сравнению с механической обработкой. Виброударное упрочнение дополнительно повышает долговечность еще на 50—100 %, в то время как в отсутствие виброшлифования оно малоэффективно. Поэтому виброшлифование литья перед виброударным упрочнением проводить следует обязательно. При механически обработанных поверхностях виброударное упрочнение в малоцикловой области малоэффективно.

Результаты испытаний при чистом изгибе механически обработанных (фрезерованных) образцов показали что, вакуумный отжиг по сравнению с отжигом в аргоне практически не снижает долговечность, а виброударное упрочнение значительно (в 2,5—3,5 раза) повышает ее.

Виброшлифование целесообразно применять как процесс механической зачистки свободным абразивом. В этих случаях нет необходимости в округлении острых кромок, в то время как перед виброупрочнением (в отсутствие виброшлифования) они должны быть скруглены до радиуса не менее 1 мм. Шероховатость механически обработанной поверхности перед виброшлифованием должна быть $R_z < 40$, а поверхности литья - без зачистки (кроме выведения дефектов) должны иметь шероховатость, соответствующую техническим условиям.

Так как большинство поверхностей штамповок не подвергается механической обработке, следует их виброшлифовать перед виброупрочнением. Упрочняющая обработка повышает долговечность после виброшлифования на порядок, после других видов механической обработки - в 2 и более раз.

6.4. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПД ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДРОБЬЮ

Отработанные условия и режимы упрочнения титановых пружин стеклянной дробью явились основой для разработки, установки, предназначенной для их упрочнения, а также других деталей с поверхностями тел вращения. Такие установки в настоящее время внедрены на ряде заводов.

Наиболее распространена установка УУСП-7, расположенная на горизонтальной поверхности металлического каркаса, в котором находятся система управления электроприводами, пневмосистема с кранами, регуляторами давления, пневмореле и т.д. Здесь же установлено реле времени для автоматического выключения цикла обработки по истечении его длительности. Пульт управления вынесен на горизонтальную поверхность справа. Установка включает в себя механизм вращения детали (пружины), устройство для установки детали (шпиндель, поддерживающий центр), которое смонтировано в камере, два эжекционных аппарата, один из которых установлен под углом 60° к оси упрочняемой детали, и механизм их перемещения.

Основным агрегатом установки является камера, в которой помимо устройства для крепления детали имеется паз для ползушки с эжекторами, окно для вентиляции и крышка с герметизирующей прокладкой.

Основные технические характеристики, установки УУСП-7:

частота вращения шпинделя, об/мин	4, 3
длина хода эжекторов, мм	150, 200, 240
максимальная длина детали, мм	220
скорость перемещения эжекторов, м/мин	630, 860, 1030
время экспозиции, с	13, 17, 20
производительность эжектора по стеклянной дроби, кг/мин	4—6
масса стеклянной дроби в камере, кг	10—20
требуемое давление воздуха, МПа	0,5

Установка может работать как в режиме наладки, так и в полуавтоматическом. В режиме наладки проверяются все движения установки и проводится, если требуется, пробное упрочнение детали и образцов-свидетелей. Далее работа проводится в полуавтоматическом режиме, который имеет блокировки по закрытию камеры крышкой и по минимальному давлению в пневмосети.

Работа по упрочнению производится в следующей последовательности:
пружина (или другая деталь) устанавливается в шпиндель, поджимается с другой стороны центром и проверяется ее положение относительно эжекторов;

проверяется давление в сети и устанавливается давление на каждом эжекторе;

устанавливается длительность цикла обработки по реле времени; камера закрывается крышкой, и включается цикл обработки и отсос пыли;

упрочнение в течение цикла и отключение установки;

снятие крышки с камеры и смена детали или перестановка ее, если это требуется по конфигурации детали.

В процессе обработки дробь циркулирует в замкнутой системе от эжекторов на приемник в днище камеры и по эжекционной схеме обратно в эжекторы. Образующаяся пыль отсасывается пылесосом или вентилятором.

На основании опыта эксплуатации установок УУСП-7 изготовлена установка УУСП-9, предназначенная для упрочнения стеклянной дробью широкой номенклатуры деталей, в основном изготавливаемых из титановых сплавов, типа пружин, цилиндров, штоков, качалок, кронштейнов, тяг и т.д. Установка имеет три камеры: в двух используется струйно-пневматический способ подачи дроби (в одной из них на внутренние поверхности вращения), в третьей — струйно-механический способ подачи дроби с использованием дробеметного колеса. В последнем случае упрочнению могут подвергаться детали с самой разнообразной конфигурацией внешней поверхности. Все три камеры установлены на общем основании и каждая имеет свой пульт управления. В камере № 1 можно упрочнять детали длиной до 540 мм, в сопловой камере № 2 — до 500 мм, в дробеметной камере — длиной до 600 мм с диаметром описанной окружности до 320 мм. Все камеры работают в полуавтоматическом режиме, условия которого устанавливаются оператором на пульте управления.

Отработанные условия и режимы упрочнения стальной дробью монолитных и сварных конструкций из сплава ВТбч явились основой для разработки технологии и оборудования для упрочнения ППД крупногабаритных конструкций (балок центроплана, поворотного узла и др.). Трудность осуществления упрочняющей обработки обусловлена большими габаритными размерами деталей, необходимостью упрочнения внутренних и наружных поверхностей с множеством ребер, образуемых стрингерным набором панелей и лонжеронами, оребренными в продольном и поперечном направлениях.

Для этой цели были изготовлены специальные многосопловые установки для упрочнения внутренних и наружных поверхностей, работающие по полуавтоматическому циклу. Упрочнение с использованием указанных установок осуществляется с помощью последовательных проходов сопловыми блоками обрабатываемых поверхностей. Сварные зоны упрочнялись по режиму высокой интенсивности с прогибом контрольных образцов 2,5—3,5 мм.

Качество упрочненной поверхности оценивается по сплошности — визуально по эталону, по интенсивности упрочнения — по прогибу образцов-свидетелей. По показаниям приборов на пульте управления контролируются режимы упрочнения: скорость перемещения упрочняющего блока и давление сжатого воздуха на входе в эжекторы.

Отдельные участки поверхности упрочняются с помощью беспыльной трехкамерной установки "Каскад", модернизированной для регулирования давления воздуха на входе в сопло, при использовании плоских и угловых насадок на сопловую головку, а также технологических пластин и мягких вкладышей.

В целом комплекс указанных технологических установок в сочетании с устройствами для подготовки и регенерации дроби обеспечил упрочнение всех зон крупногабаритных сварных конструкций в опытном и серийном производстве, что создало условия для изготовления надежных и высокоресурсных изделий.

ГЛАВА 7. ПОСТАНОВКА ВТУЛОК ДОРНИРОВАНИЕМ В ОТВЕРСТИЯ УШКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В конструкции применяются ушковые соединения без втулок и с запрессованными по посадке И8 втулками. Недостатками запрессовки втулок

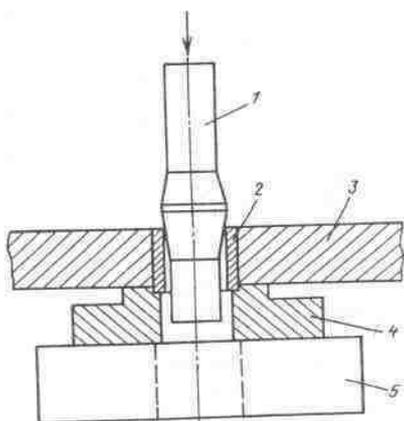


Рис.11. Схема постановки втулки дорнированием при проталкивании: 1 — дорн; 2 — втулка; 3 — деталь; 4 — опорное кольцо; 5 — подставка

являются слабое крепление втулки, ослабление сечений проушины, недостаточное сопротивление усталости, отсутствие упрочнения.

Постановка втулок дорнированием предусматривает повышение усталостной долговечности вильчатых соединений, увеличение прочности креп-

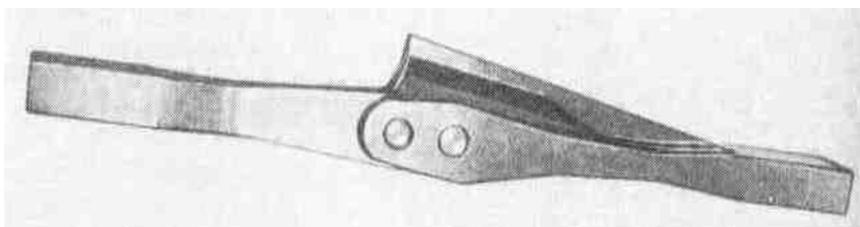


Рис.12. Натурный образец вильчатого соединения из сплава ВТ6ч. с втулками а 30 мм, поставленными дорнированием

ления втулок в отверстия, устранение или уменьшение развития фреттинг-коррозии, снижение массы конструкции за счет уменьшения толщины стенок втулки, улучшение условий работы пары трения.

В плиты из сплава ВТ6ч устанавливались дорнированием втулки из стали 30ХГСА по схеме (рис. 11). Втулки устанавливались под болты $\varnothing 10$, 16, 36 мм и сравнивались усилия при постановке втулок и выпрессовке. Уси-

лие при постановке втулок дорнированием в 6—12 раз больше, чем при их запрессовке, а усилие при их выпрессовке в 2—3 раза выше, несмотря на уменьшение толщины стенок втулки приблизительно в 3 раза. После постановки втулок дорнированием отверстия калибровались разверткой до требуемых параметров размера, точности отверстия и шероховатости поверхности.

Усталостные испытания проушин из сплава ВТ6ч с отверстиями $\varnothing 16$ мм при отнулевом растяжении показали, что проушины с поставленными дорнированием втулками имеют усталостную долговечность в 2—7 раз выше, чем с запрессованными втулками; причем долговечность растет со снижением уровня нагружения. Испытания натуральных образцов из сплава ВТ6ч с отверстиями ~ 30 мм, имитирующих узел навески двигателя (рис. 12), также показали, что при наличии поставленных дорнированием втулок долговечность приблизительно в 8 раз превышает ее значение в отсутствие втулок. При этом на образцах со втулками отсутствовали какие-либо следы фреттинг-коррозии.

ГЛАВА 8. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ТВЕРДЫМ ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Титановые сплавы без специальной подготовки поверхности имеют низкие антифрикционные свойства, склонны к схватыванию в паре трения с любым материалом и практически в этих условиях неработоспособны. В то же время целесообразность их применения несомненна. Поэтому для обеспечения работоспособности в узлах трения поверхностей деталей из титановых сплавов на них следует наносить твердые износостойкие покрытия. С этой целью на поверхность конструкции и деталей наносят хромовые покрытия.

Твердый хром, нанесенный на высокопрочные материалы, существенно

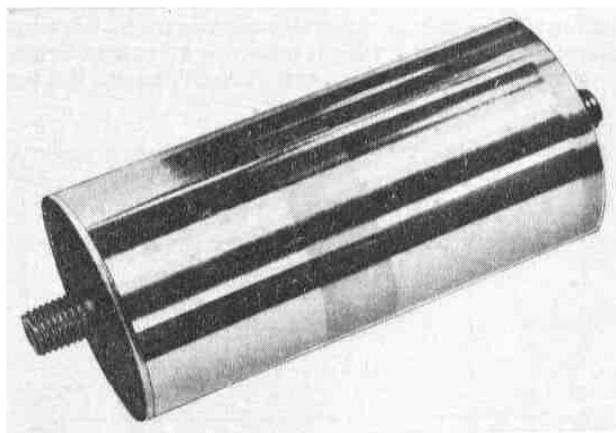


Рис.13. Образец, из сплава ВТ6ч с хромовым покрытием после шлифования и алмазного выглаживания

снижает сопротивление усталости. Кроме того, нужно обеспечить хорошую адгезию покрытия к подложке и возможность абразивной обработки покрытия (например, шлифованием) с последующим алмазным выглаживанием, которое наряду с функциональным назначением является контрольной пробой (наряду со шлифованием) сцепления покрытия и подложки.

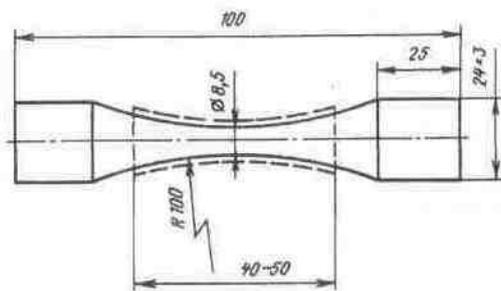


Рис.14 Образец для усталостных испытаний (толщина хромового покрытия 30—50 мкм)

В комплексном исследовании титановых деталей с хромовым покрытием адгезия проверялась шлифованием хромового покрытия до рабочей толщины 40—50 мкм (от исходной 100—120 мкм) и последующим алмазным выглаживанием. Шлифованный и выглаженный образец показан на рис. 10.24. В центре и справа видны участки после шлифования, слева и между

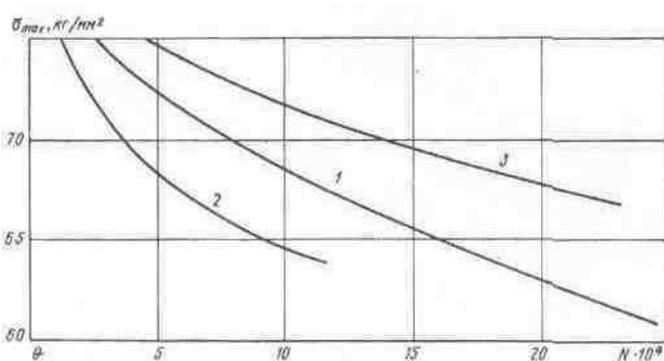


Рис.15. Кривые усталости сплава ВТ64 при повторном, растяжении: 1 — точение; 2 — хромирование; 3 — хромирование и алмазное выглаживание

шлифованными участками — выглаженные по хрому. Шероховатость поверхности после шлифования соответствовала $R_z = 0,63$, после выглаживания $R_z = 0,16$. Остаточные напряжения в поверхностном слое хромового покрытия после шлифования являются растягивающими и составляют 250 МПа; после алмазного выглаживания создаются остаточные напряжения сжатия величиной 500 МПа. Сопротивление усталости исследовалось на образцах в области ограниченной усталости при отнулевом растяжении с частотой 8—10 цикл/мин (рис. 14). Хромирование с последующим шлифованием несколько снижает усталостную долговечность по сравнению с точеными образцами (рис. 15), несмотря на упрочняющую обработку под покрытие — обдувку корундовым песком. Последующее алмазное выглаживание по хрому повышает долговечность в 3—4 раза, что значительно выше усталостной долговечности образцов без покрытия.

Исследование антифрикционных свойств и износостойкости хромового покрытия на сплаве ВТ64 показало, что они ничем не отличаются от свойств, полученных при нанесении твердого хрома на стальную подложку. Таким образом, можно сделать заключение о высокой работоспособности хромового покрытия на деталях из титановых сплавов при условии обеспечения качественного выполнения технологии хромирования с последующей абразивной обработкой и алмазным выглаживанием как функциональной, контрольной и упрочняющей операцией.

Литература

1. Справочник металлиста, 2 т. Москва, «Машиностроение» , 1976.
2. Александров В.Г. Справочник по авиационным материалам. Москва, «Транспорт», 1976.
3. Белов А.Ф. Николенко В.В. Строение и свойства авиационных материалов. Москва, «Металлургия» 1989.
4. Кривоухов В.А. Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. Москва, «Машиностроение».
5. Кулешова И.В, Берман З.К. Повышение резанием труднообрабатываемых материалов. Москва, НИИМАШ, 1981.
6. Сайдахмедов Р.Х. Карпман М.Г. Фетисов Г.П. Многокомпонентные покрытия, формируемые ионно-плазменным методом. Ташкент, «Фан», 1999. -132с.
7. Верещака А.С. Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. -192с.
8. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы.
9. Кабалдин Ю.Г, Кожевников Н.Е, Селезнев В.В. Повышение износостойкости инструмента. Москва, «Машиностроитель» 1988г.
10. Технология производства титановых самолётных конструкций/ А.Г. Братухин, Б.А. Колачев, В.В. Садков и др. – М.: Машиностроение, 1995.-448 с.
11. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. - М.: МИСИС, 1999.-416 с.
12. Водородная технология титановых сплавов/ А.А. Ильин, Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов. - М.: МИСИС, 2002.-392 с.

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Применение титановых сплавов в самолетостроение.....	4
Глава 2. Основные свойства и структурные особенности титана и его сплавов.....	10
2.1. Химический состав и специфика химических свойств.....	10
2.2. Механические свойства титановых сплавов.....	12
2.3. Физические свойства.....	12
2.4. Металлографическая структура и классификация титановых сплавов.....	14
Глава 3. Обрабатываемость резанием титановых сплавов.....	14
3.1. Тепловые явления в процессе резания.....	16
3.2. Износ режущего инструмента.....	17
3.2.1. Износ режущего инструмента при обработке по корке...	17

3.2.2. Износ режущего инструмента при чистовом и получистовом точении.....	18
3.3. Повышение эффективности обработки резанием титановых сплавов твердосплавными инструментами и инструментами из быстрорежущей стали.....	20
3.4. Упрочнение инструментов для обработки титановых сплавов.....	21
3.5. Механическая обработка и упрочнение поверхностным пластическим деформированием самолётных деталей из титановых сплавов.....	26
3.6. Оборудование и инструмент для механической обработки.....	27
3.7 Причины коробления деталей, изготовленных из кованных плит титанового сплава	33
3.8. Зачистка деталей из титановых сплавов свободным абразивом.....	34
Глава 4. Обработка отверстий в смешанных пакетах.....	35
4.1. Разделка отверстий в смешанных пакетах и отверстий большого диаметра в титановых сплавах при ограниченном подходе.....	35
4.2. Раскатывание отверстий в смешанных пакетах, обкатывание и раскатывание отверстий большого диаметра.....	38
Глава 5. Накатывание резьбы на болтах из термоупрочняемых титановых сплавов.....	41
Глава 6. Дробеударное упрочнение титанового сплава	42
6.1. Дробеударное упрочнение сварного соединения из титанового сплава	43
6.2. Эффективность упрочнения дробью титанового сплава с альфированной поверхностью.....	46
6.3. Эффективность и технология упрочнения фасонного литья из сплава ВТ5Л и штамповок из сплава ВТ22.....	47
6.4. Оборудование и технология для упрочнения ППД титановых деталей дробью.....	48
Глава 7. Постановка втулок дорнированием в отверстия ушковых соединений деталей из титановых сплавов.....	50
Глава 8. Работоспособность титановых сплавов с твердым хромовым покрытием.....	51
Литература.....	53