

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хорев А.И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов.– М.: Машиностроение, 1979, 228 с.
2. Хорев А.И. Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов.– М.: Воениздат, 1979, 256 с.
3. Хорев А.И. Опыт применения титановых сплавов в народном хозяйстве.– М.: ЦНИИТЭМС, 1977, 37 с.
4. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. и др. Металловедение титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1992, 352 с.
5. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспективы их развития //В сб.: Авиационные материалы и технологии, 2002, с. 11–32.
6. Хорев А.И. Титан – это авиация больших скоростей и космонавтика //Технология легких сплавов, 2002, №4, с. 92–97.
7. Хорев А.И. Механические свойства сварных соединений ( $\alpha+\beta$ )- и  $\beta$ -титановых сплавов //Цветные металлы, 2006, №1, с. 77–83.
8. Хорев А.И. Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами //Титан, 2006, №1(18), с. 47–52.
9. Хорев А.И. Перспективные направления создания композиционных материалов на основе титана //Труды Международной конференции «Ti-2006», Ассоциация «Титан», 2006, с. 328–335.
10. Хорев М.А. Структурно-фазовое состояние и надежность сварных соединений титановых сплавов.– М.: ВИАМ, 1991, 107 с.
11. Хорев А.И. Разработка титановых сплавов методом комплексного легирования //ФХММ, 2006, т. 42, №5, с. 45–50.
12. Хорев А.И. Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава ВТ23 универсального применения //Вестник машиностроения, 2006, № 9, с. 40–46.
13. Хорев А.И. Теория и практика разработки конструкционных слоистых материалов из титановых сплавов //Труды Международной конференции «Ti-2006», Ассоциация «Титан», 2006, с. 336–341.
14. Хорев А.И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ( $\alpha+\beta$ )- и  $\beta$ -титановых сплавов //Технология машиностроения, 2007, №2, с. 29–34.

*С.В. Скворцова\**

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ РАЗНЫХ КЛАССОВ**

Полуфабрикаты из титановых сплавов, особенно листовые, характеризуются анизотропией физико-механических свойств, которые в значительной степени определяются кристаллографической текстурой  $\alpha$ -фазы.

Текстура полуфабрикатов или изделий может формироваться в процессе холодной, теплой или горячей деформации, в ходе протекания процессов рекристаллизации или фазовых превращений и оказывать существенное влияние на технологические и эксплуатационные свойства.

---

\* РГУ МАТИ им. К.Э. Циолковского.

Поэтому в работе были изучены вопросы текстурообразования в листовых полуфабрикатах титановых сплавов разных классов при пластической деформации и последующей термической обработке, а также оценено влияние текстуры на анизотропию механических свойств.

Для  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов характерна однотипная текстура, характеризующаяся расположением плоскости базиса (0001) в плоскости прокатки листа. Незначительное отличие в распределении полюсной плотности в направлении прокатки и поперечном направлении обуславливает слабую анизотропию механических свойств. При этом прочность в направлении прокатки выше, чем в поперечном направлении.

Для листовых полуфабрикатов двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов, полученных по промышленной технологии, также характерна однотипная текстура, но она принципиально отличается от текстуры  $\alpha$ -сплавов. В плоскости прокатки преимущественно располагаются плоскости призмы  $\{11\bar{2}0\}$ , в направлении прокатки – направления  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  и в поперечном направлении – базисное направление [0001]. Такая текстура вызывает большое различие в механических свойствах в двух взаимно перпендикулярных направлениях, причем в отличие от свойств  $\alpha$ -сплавов предел прочности ( $\alpha+\beta$ )-сплавов в направлении прокатки ниже, чем в поперечном направлении.

Для листовых полуфабрикатов псевдо- $\beta$ -титановых сплавов формирование текстуры  $\beta$ -фазы зависит от температуры деформации. Деформация в  $\beta$ -области приводит к образованию текстуры динамической рекристаллизации, характеризующейся преимущественным расположением плоскостей  $\{110\}$  в направлении  $\langle 001 \rangle$ , а прокатка при комнатной температуре – к образованию текстуры деформации  $\beta$ -фазы, когда плоскости  $\{001\}$ ,  $\{111\}$  располагаются в направлении  $\langle 110 \rangle$ .

Последующий нагрев до  $\beta$ -области не приводит к принципиальному изменению текстуры листа, полученного горячей прокаткой в  $\beta$ -области. В то же время нагрев до  $\beta$ -области холоднодеформированного листа приводит к формированию текстуры статической рекристаллизации  $\beta$ -фазы, характеризующейся расположением плоскостей типа  $\{111\}$  в направлении  $\langle 110 \rangle$ .

Различие в кристаллографической текстуре  $\beta$ -фазы обуславливает и различие в кристаллографической текстуре  $\alpha$ -фазы, образующейся при старении. При старении холоднодеформированного полуфабриката, в плоскости прокатки повышенную полюсную плотность имеют плоскости призмы  $\{11\bar{2}0\}$ , в то время как старение после рекристаллизационного отжига приводит к формированию практически бестекстурной  $\alpha$ -фазы. Поэтому в первом случае наблюдается сильная анизотропия свойств в двух направлениях, а во втором – получается практически изотропный материал. Таким образом, текстура  $\beta$ -фазы, сформировавшаяся на технологической стадии, оказывает существенное влияние на анизотропию механических свойств после упрочняющей термической обработки.

Изделия новой авиационной техники требуют применения элементов листовых конструкций из высокопрочных сплавов. Для листовых конструкций с этой точки зрения особый интерес представляют промышленные ( $\alpha+\beta$ )-титановые сплавы типа ВТ23. Эти конструкционные сплавы являются в определенной мере универсальным материалом, поскольку для них существует широкая возможность с помощью термической обработки изменять структуру, а соответственно и свойства. В то же время для данного класса сплавов характерна более сильная анизотропия свойств по сравнению с  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавами. К настоящему времени вопросы текстурообразования наиболее полно изучены только для широко известного в мире сплава Ti–6Al–4V (ВТ6), а для высоколегированных ( $\alpha+\beta$ )-сплавов аналогичных исследований проведено недостаточно.

Для изучения процесса формирования текстуры в зависимости от температуры деформации и последующего отжига был выбран титановый сплав ВТ16, так как благодаря пониженному содержанию алюминия этот сплав имеет высокую технологическую пластичность как при повышенных, так и при комнатной температурах.

Горячая прокатка сплава ВТ16 приводит к формированию текстуры динамической рекристаллизации  $\beta$ -фазы. При последующем охлаждении до комнатной температуры в результате протекания ( $\beta \rightarrow \alpha$ )-превращения формируется текстура превращенной  $\alpha$ -фазы, которая вследствие сдвигового механизма ее зарождения связана с исходной  $\beta$ -фазой ориентационными соотношениями Бюргерса.

Теплая и холодная прокатка приводят к образованию текстуры деформации как для  $\beta$ -, так и для  $\alpha$ -фазы, когда в плоскости прокатки расположены базисные плоскости.

Последующий отжиг приводит к постепенной переориентации кристаллов  $\alpha$ -фазы в результате протекания ( $\beta \rightarrow \alpha$ )-превращения – от базисной (0001) до призматической  $\{11\bar{2}0\}$ .

Формирование такого типа текстуры в ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавах обусловлено тем, что зарождение  $\alpha$ -фазы идет по сдвиговому механизму, и, следовательно, имеет место деформация формы, т. е. в направлении прокатки будут образовываться не все возможные ориентировки  $\alpha$ -фазы, а только та, которая обеспечивает растяжение решетки при ( $\beta \rightarrow \alpha$ )-превращении; в нормальном направлении – та ориентировка, которая обеспечивает сжатие решетки, а в поперечном направлении – та ориентировка, которая обеспечивает незначительную деформацию решетки. Таким образом, для ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов в самой природе ( $\beta \rightarrow \alpha$ )-превращения, происходящего в процессе деформации, последующего охлаждения и отжига, заложено формирование кристаллографической текстуры  $\alpha$ -фазы, а следовательно и анизотропии свойств.

Одним из способов получения более изотропного материала является применение теплой продольно-поперечной прокатки с последующим низкотемпературным отжигом, применяемым в настоящее время на Верхнесалдинском производственном объединении для производства листов из сплава ВТ6. Такая технология обеспечивает практически идентичную картину в распределении полюсной плотности в направлении прокатки и поперечном направлении, а следовательно, и равную прочность. В то время как для листа, полученного по стандартной технологии, разница в свойствах в двух направлениях составляет 150–200 МПа.

Другим способом получения изотропного материала является водородная технология. В РГУ МАТИ разработана технология получения листовых полуфабрикатов из сплава ВТ6, основанная на эффекте водородного пластифицирования. Являясь сильным  $\beta$ -стабилизатором, водород не только понижает температуру полиморфного превращения, что позволило снизить до 700°C температуру прокатки, но и способствует перераспределению легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами. Прокатка в наводороженном состоянии и последующий низкотемпературный вакуумный отжиг позволили создать в листе субмикроструктурную композитную структуру, состоящую из первичных частиц  $\alpha$ -фазы, обогащенной алюминием до состава  $\alpha_2$ -фазы, небольшого количества  $\beta$ -фазы и вторичной  $\alpha$ -фазы, образующейся из  $\beta$  в процессе дегазации и поэтому обедненной алюминием.

Несмотря на то что процесс прокатки проходил в верхнем температурном интервале ( $\alpha+\beta$ )-области, в  $\beta$ -фазе формируется текстура динамической рекристаллизации, а выделяющаяся в процессе вакуумного отжига  $\alpha$ -фаза имеет практически одинаковое распределение полюсной плотности во всех трех направлениях, т. е. формируется практически бестекстурная  $\alpha$ -фаза, что позволяет в 5–10 раз уменьшить анизотропию свойств.