

Особенности структуры поверхностного слоя титанового сплава ВТ6 после деформирующего резания и последующей химико-термической обработки

© И.А. Кельдиева¹, С.Г. Васильев², В.Н. Симонов²,
А.Г. Дегтярева², А.Е. Смирнов²

¹ООО НПК «Фаворит», Москва, 111125, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Исследовано влияние предварительной обработки деформирующим резанием на толщину, структуру и твердость упрочненного диффузионного слоя при последующем азотировании и оксидировании титанового сплава ВТ6. Установлено, что при получении оребренных макроструктур деформирующим резанием за счет интенсивного механического и термического воздействия превышена температура фазового перехода. Последующая химико-термическая обработка макроструктур, полученных деформирующим резанием, приводит к формированию упрочненного слоя по всему периметру ребра. Показано, что наиболее эффективным способом химико-термической обработки таких макроструктур является оксидирование, так как обеспечивается практически двукратное повышение толщины упрочненного слоя и бóльшая твердость при значительно меньшем времени обработки.

Ключевые слова: титановые сплавы, деформирующее резание, химико-термическая обработка, диффузионный слой, микротвердость

Введение. Тенденцией современного машиностроения является снижение общей массы конструкций за счет использования материалов с высокой удельной прочностью. Особый интерес представляют титановые сплавы, имеющие высокие показатели механической прочности, коррозионной стойкости, малую плотность. Титановые сплавы успешно применяются во многих отраслях машиностроения в виде разнообразных деталей и элементов конструкций [1, 2]. Однако для узлов пар трения скольжения титановые сплавы используются ограниченно, поскольку имеют низкую износостойкость, высокую склонность к схватыванию и задиру и высокий коэффициент трения [3]. Склонность титановых сплавов к контактному схватыванию обусловлена их высокой пластичностью и низким модулем упругости [4]. Для повышения износостойкости титановых сплавов в парах трения скольжения применяются такие виды химико-термической обработки (ХТО), как азотирование и оксидирование [5–7]. Однако ХТО титановых сплавов имеет ряд отличительных особенностей. Скорость диффузии легирующих элементов в титане значительно ниже, чем у

сталей, что обуславливает малую толщину упрочненного слоя [8]. Азотированные и оксидированные слои имеют толщину от единиц до десятков микрон, что на операциях окончательной обработки до требуемых размеров приводит к существенным затруднениям.

Для увеличения толщины упрочненного слоя поверхности деталей из титановых сплавов предлагается комбинированная обработка, состоящая в предварительном формировании развитого макрорельефа в виде оребрения на наружной поверхности детали деформирующим резанием (ДР) [9] с последующей ХТО [10]. В этом случае толщина упрочненного слоя после ХТО определяется глубиной резания при обработке методом деформирующего резания (ДР) и может достигать 2,0 мм [11, 12]. Схема обработки методом ДР представлена на рис. 1 [13].

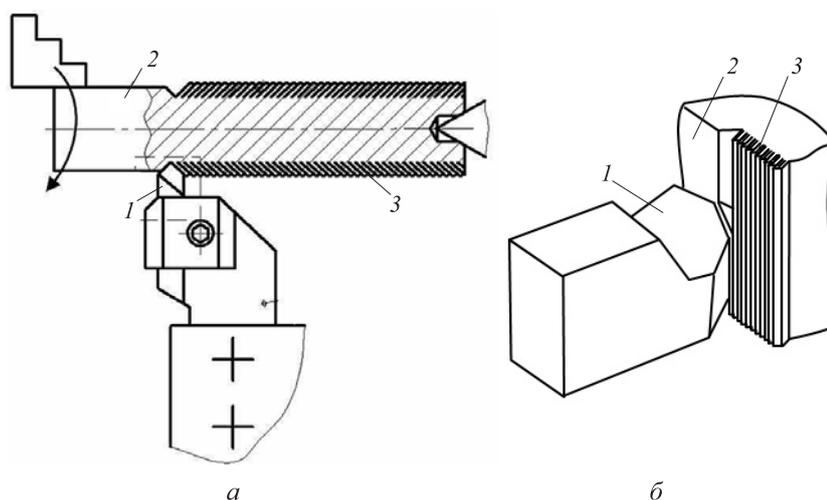


Рис. 1. Общая схема (а) и зона обработки (б) методом ДР:
1 — инструмент; 2 — заготовка; 3 — оребренная поверхность

В результате ДР на поверхности заготовки образуется структура в виде чередующихся ребер, имеющих узкие межреберные зазоры с параметрами, управляемыми режимом ДР и геометрией инструмента [14]. Наличие зазоров обеспечивает прямой доступ газообразного компонента на поверхности титанового сплава на всю высоту ребра, что увеличивает толщину модифицированного слоя.

После обработки ДР площадь поверхности, подвергаемой насыщению, увеличивается в несколько раз. Насыщающая среда заполняет межреберный зазор, и массоперенос происходит через боковые поверхности ребер. Помимо этого, ребра, представляющие собой неотделившуюся от заготовки стружку, характеризуются повышенной плотностью дефектов, что обеспечивает не только деформацион-

ное упрочнение, но и ускорение твердотельной диффузии. Для практического использования деталей с упрочненной поверхностью после ДР и ХТО заострение вершин ребер удаляется.

Цель данной работы — исследование влияния предварительной обработки ДР на толщину, структуру и твердость упрочненного слоя при последующем азотировании и оксидировании титанового сплава VT6.

Методика исследований. В качестве объекта исследования выбран титановый сплав VT6 с микротвердостью $280 \text{ HV}_{0,025}$. Химический состав сплава VT, % (мас.) [3]: $\leq 0,3\text{Fe}$, $(3,5-5,3)\text{V}$, $(5,3-6,8)\text{Al}$, $\leq 0,3\text{Zr}$, $\leq 0,1\text{C}$, $\leq 0,15\text{Si}$, $\leq 0,05\text{N}$, $\leq 0,2\text{O}$, $\leq 0,015\text{H}$, основа — Ti.

Оребрение ДР титанового сплава VT6 проводилось на станке 16K20 на цилиндрических образцах диаметром 100 мм твердосплавным резцом из сплава BK8. Скорость резания составляла 15,6 м/мин, подача инструмента — 0,2 мм/об, глубина ДР — 0,4 мм.

Образцы после ДР подвергали вакуумному азотированию при температуре $830 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 ч при давлении 50 кПа.

Азотирование проводили в универсальной вакуумной установке (рис. 2) в атмосфере азота особой чистоты.

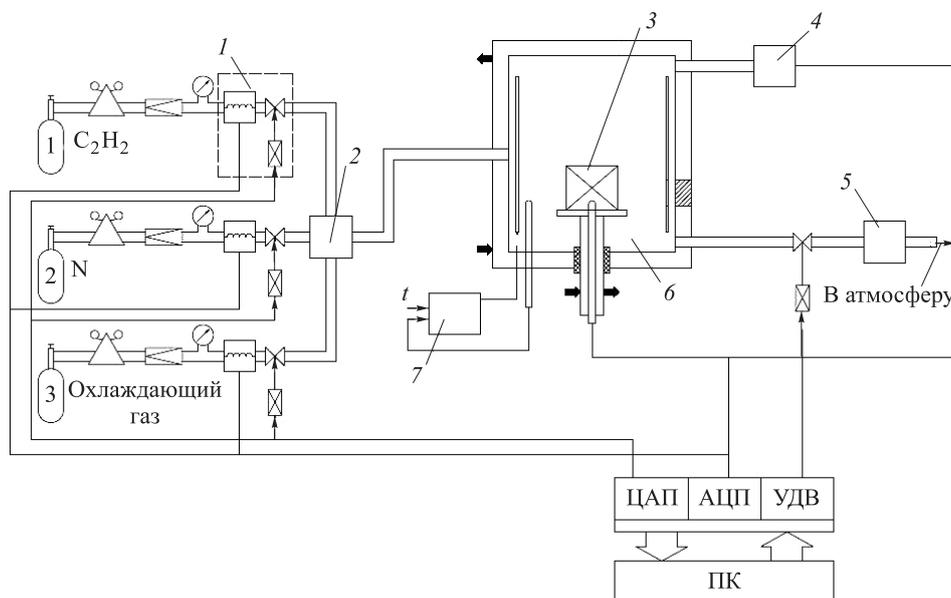


Рис. 2. Схема универсальной вакуумной установки:

1 — регулятор расхода; 2 — смеситель; 3 — образец; 4 — датчик давления; 5 — вакуумный насос; 6 — вакуумная камера; 7 — локальный регулятор; УДВ — устройство дискретного ввода-вывода; АЦП аналого-цифровой преобразователь; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; ПК — персональный компьютер; \Rightarrow — магистраль водяного охлаждения; \equiv — вакуумно-газовые магистрали

Система подготовки газов установки обеспечивает дозированное поступление рабочей среды в камеру. Она состоит из станции баллонов, системы трубопроводов с редукторами и автоматическими регуляторами расхода компонентов газовой среды. Вакуумная система, включающая в себя форвакуумный насос НВР-5Д, обеспечивает предварительное разрежение, прокачку газовой среды, а также регулирование давления. Для контроля и регулирования температуры использованы два датчика: один — контролирует температуру внутреннего пространства рабочей камеры, а другой — температуру образца-свидетеля. Установка полностью автоматизирована. Система управления технологическим процессом предусматривает регулирование температуры процесса насыщения, давления газовой среды и ее состава, а также измерение и запись всех технологических и вспомогательных параметров процесса.

Расход газа при азотировании составил 4...6 дм³/ч. Выбор температуры нагрева для азотирования 830 °С обусловлен несколькими причинами: при температуре, превышающей температуру полиморфного превращения сплава ВТ6, составляющей 989 °С [2, 3], начинается интенсивный рост зерна, а при температуре ниже 800 °С скорость диффузии азота существенно снижается, что приводит к увеличению времени обработки.

Оксидирование образцов после обработки ДР проводили в электрической печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ при температуре 800 °С в течение 6 ч. Образцы обрабатывали в засыпке измельченного графитового порошка для уменьшения скорости окисления и предотвращения образования на поверхности слоя рыхлого оксида титана.

Металлографические исследования и измерение микротвердости выполняли на шлифах поперечных сечений упрочненных структур. Образцы для шлифов изготавливали на электроэрозионном проводочно-вырезном станке.

Готовые шлифы подвергали химическому травлению в реактиве (2 мл HNO₃, 2 мл HF, 96 мл H₂O), затем проводили исследования на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 100 раз.

Микротвердость по Виккерсу определяли в автоматическом режиме на микротвердомере DuraScan 70 фирмы STRUERS. Проводили три серии измерений по 10 отпечатков с нагрузкой 25 г, расстояние между отпечатками составляло 40 мкм. Схема измерения микротвердости образцов представлена на рис. 3.

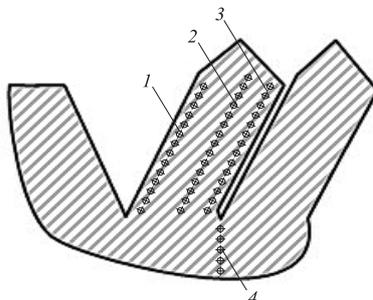


Рис. 3. Схема измерения микротвердости:
1–3 — прирезцовая, средняя и свободная зоны
ребра; 4 — переходная зона

Результаты и их обсуждение. Сплав ВТ6 в исходном состоянии имеет двухфазную структуру $(\alpha+\beta)$ -Ti. В процессе обработки ДР в следствие интенсивного механического и термического воздействия в поверхностном слое происходит фазовое превращение $(\alpha+\beta)$ -Ti \rightarrow β -Ti. При последующем охлаждении β -Ti распадается с образованием метастабильной фазы β' -Ti. Данный переход происходит при температуре 989 °С. Зона термического влияния распространяется по всему объему оребренной структуры и на переходную зону (рис. 4). Микротвердость после ДР в ребрах и переходной зоне составляет 310...330 HV_{0,025}.

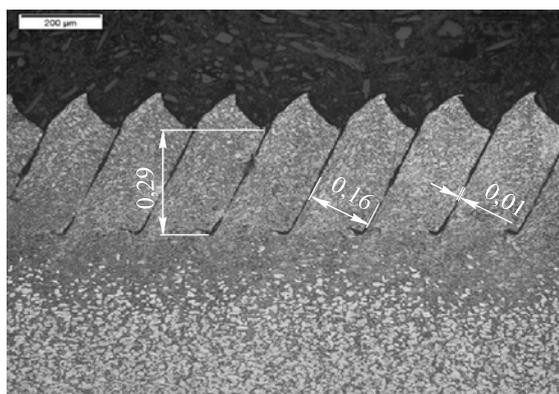


Рис. 4. Микроструктура поверхности образца из сплава ВТ6 после обработки ДР, $\times 100$

Последующее азотирование происходит при температуре ниже температуры полиморфного превращения, поэтому метастабильная β' -фаза распадается с образованием структуры $\alpha+\beta$. Установлено, что структура ребер и переходная зона содержат большее количество

светлой α -фазы (рис. 5), в которой растворимость азота выше, чем в β -фазе. При максимальной концентрации азота образуется сплошной нитридный слой толщиной около 10 мкм. Он наблюдается по всему периметру ребра. Диффузия азота ускоренно протекает по границам $\alpha+\beta$ кристаллов и приводит к образованию дисперсных частиц нитридов титана.

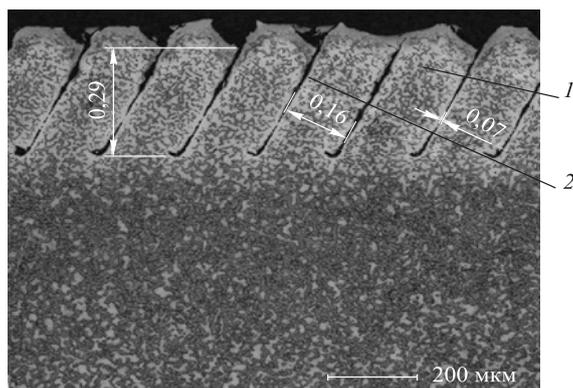


Рис. 5. Микроструктура поверхности образца из сплава ВТ6 после обработки ДР с последующим азотированием, $\times 100$:
1 — $(\alpha+\beta)$ -Ti; 2 — нитридный слой

Микротвердость в ребре (прирезцовая и средняя зоны) и в переходной зоне составляет 460...480 $HV_{0,025}$, микротвердость в сердцевине — 370 $HV_{0,025}$, что соответствует твердости сплава ВТ6 в исходном состоянии. Повышение микротвердости в приповерхностной зоне обусловлено увеличенной концентрацией азота.

В структуре сплава ВТ6 после обработки ДР с последующим оксидированием (рис. 6) по периметру ребер образуется более толстый, чем при азотировании слой оксида титана TiO толщиной около

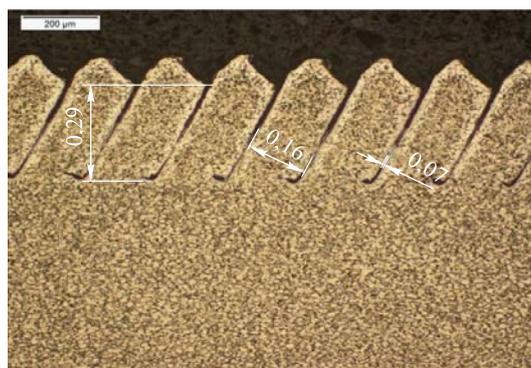


Рис. 6. Микроструктура поверхности образца из сплава ВТ6 после обработки ДР с последующим оксидированием, $\times 100$

25 мкм с микротвердостью 600...680 $HV_{0,025}$. Микротвердость в середине ребра значительно меньше, чем на поверхности, и составляет 450 $HV_{0,025}$. Возможно, это связано с торможением диффузии кислорода вглубь ребра при формировании упрочненного слоя [15, 16].

Сравнительные результаты измерения микротвердости образцов из сплава ВТ6 после обработки ДР с последующим азотированием и ДР с последующим оксидированием представлены на рис. 7.

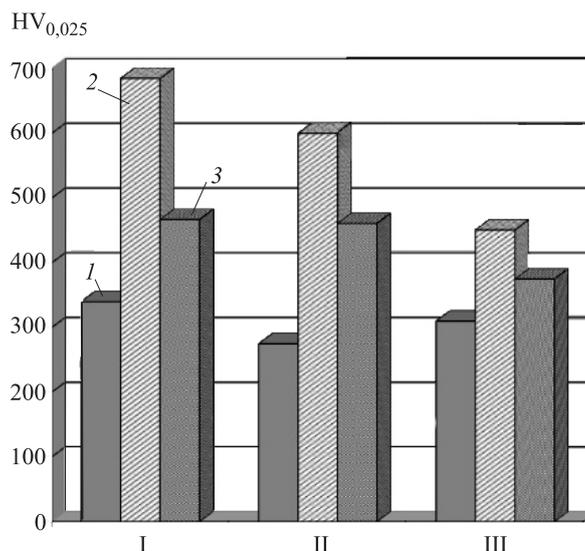


Рис. 7. Результаты измерений микротвердости упрочненной зоны после обработки ДР (1), обработки ДР с последующим оксидированием (2) и ДР с последующим азотированием (3):

I–II — прирезцовая и свободная зоны ребра; III — середина ребра

Видно, что оксидирование обеспечивает практически двукратное увеличение толщины упрочненного слоя и бóльшую твердость упрочненной зоны по сравнению с другими вариантами обработки.

Заключение. Металлографическими исследованиями установлено, что в титановом сплаве в зоне интенсивного механического и термического воздействия при ДР превышена температура фазового перехода $(\alpha+\beta)\text{-Ti}\rightarrow\beta\text{-Ti}$, которая для сплава ВТ6 составляет 989 °С.

Проведение ХТО макроструктур, полученных методом ДР, приводит к формированию упрочненного слоя по всему периметру ребра толщиной около 25 мкм при оксидировании и около 10 мкм — при азотировании. Микротвердость упрочненной оксидированием приповерхностной зоны ребра составляет 680 $HV_{0,025}$, в то время как азотирование упрочняет приповерхностную зону лишь до 480 $HV_{0,025}$.

Более эффективным вариантом ХТО при диффузионном насыщении макроструктур, полученных методом ДР, является оксидирование, обеспечивающее повышение толщины упрочненного слоя в 2 раза и большую твердость при значительно меньшем времени ХТО и более простом термическом оборудовании.

Авторы выражают благодарность Чэн Жуй — магистру кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lutjering G., Williams J.C. *Titanium*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, p. 43.
- [2] Цвиккер У. *Титан и его сплавы*. Москва, Металлургия, 1979, 512 с.
- [3] Илларионов А.Г., Попов А.А. *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов*. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2014, 136 с.
- [4] Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Ерофеев В.К. *Конструкционные стали и сплавы*. Москва, НИЦ ИНФРА-М, 2016, 440 с.
- [5] Вульф Б.К. *Термическая обработка титановых сплавов*. Москва, Металлургия, 1969, 374 с.
- [6] Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. 3-е изд. Москва, МИСИС, 1999, 416 с.
- [7] Чечулин Б.Б., Хесин Ю.Д. *Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов*. Москва, Металлургия, 1987, 208 с.
- [8] Paul A., Divinski S. *Handbook of Solid State Diffusion: Volume 1: Diffusion Fundamentals and Techniques*. Elsevier, 2017, 548 p.
- [9] Zoubkov N.N. (РФ), Ovtchinnikov A.I. (РФ). *Method and Apparatus Producing a Surface with Alternating Ridges and Depressions*. Pat. 5775187 USA, Int. Cl. B23B 17/00. Appl. no. 545640, 1998.
- [10] Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г. и др. *Способ упрочнения поверхности детали*. Пат. 2015202 (РФ). Изобретения, 1994, № 12.
- [11] Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. *New Method of Quench Surface Turning*. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 696–701.
- [12] Зубков Н.Н., Васильев С.Г. *Повышение износостойкости деталей пар трения на основе метода деформирующего резания. Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013, № 8, с. 3–9.
- [13] Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. *Способ поверхностного закалочного упрочнения режущо-деформирующим инструментом*. Пат. на изобретение № 2556897 РФ. МПК C21D 8/00. Заявлено 21.01.2014, опубликовано 22.07.2015. Бюл. № 20.
- [14] Zubkov N., Poptsov V., Vasiliev S. *Surface Hardening by Turning without Chip Formation*. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 13–19.
- [15] Панайоти Т.А. *Создание максимальной насыщающей способности газовой среды при ионном азотировании сплавов. Физика и химия обработки материалов*, 2003, № 4, с. 70–78.

- [16] Панин С.В., Колгачев А.Е., Почивалов Ю.И., Панин В.Е., Горячева И.Г. Повышение износостойкости титанового сплава VT6 путем наноструктурирования поверхностного слоя и последующей химико-термической обработки. *Физическая мезомеханика*, 2005, т. 8, с. 101–104.

Статья поступила в редакцию 22.01.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кельцьева И.А., Васильев С.Г., Симонов В.Н., Дегтярева А.Г., Смирнов А.Е. Особенности структуры поверхностного слоя титанового сплава VT6 после деформирующего резания и последующей химико-термической обработки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1733>

Кельцьева Ирина Артуровна — инженер-конструктор ООО НПК «Фаворит». Область научных интересов: технологические процессы термической и химико-термической обработки. e-mail: irinakelts@mail.ru

Васильев Сергей Геннадиевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: повышение износостойкости деталей трения, режущий инструмент, деформирующее резание. e-mail: sergv@bmstu.ru

Симонов Виктор Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физическая химия материалов и технологических процессов. e-mail: simonov_vn@mail.ru

Дегтярева Алла Григорьевна — ассистент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: структура и свойства материалов после высокоскоростной термической обработки. e-mail: dega_70@mail.ru

Смирнов Андрей Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: технологические процессы термической и химико-термической обработки. e-mail: smirnoff@bmstu.ru