

7. Korosteleva E.N., Pribytkov G.A., Krinitcyn M.G. Structure and properties of powder cathode materials of titanium - titanium carbide system. Innovative technology and economics in mechanical engineering. National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2014. pp. 273-276.
8. А.с. №975068 (СССР). Аввакумов Е.Г., Поткин А.Р., Самарин О.И.. Планетарная мельница. Бюллетень изобретений, 1982. №43.
9. G.A. Pribytkov, M.N. Khramogin, V.G. Durakov, and V.V. Korzhova. Coatings produced by electron beam surfacing of composite materials consisting of titanium carbide and a binder of high-speed R6M5 tool steel. Welding international. Vol. 22, No. 7, July 2008, pp. 465-467.
10. Korchagin M.A., Grigor'eva T.F., Bokhonov B.B., Sharafutdinov M.R., Barinova A.P., Lyakhov N.Z. Solid-state combustion in mechanically activated shs systems. II. Effect of mechanical activation conditions on process parameters and combustion product composition. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2003. Т. 39. № 1. pp. 51-58.
11. Kalambaeva S.S., Korosteleva E.N., Pribytkov G.A. Structure of composite powders "TiC – high chromium cast iron binder" produced by SHS method. IEEE conference publications. MEACS Conference Proceedings (International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems), 2014, DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986945, Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 4.

## **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ. СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ**

*В.А. Клименов\*\*\*, д.т.н, проф., В.А. Власов\*\*\*, д.ф.-м.н. проф.,*

*В.Ю. Борозна\*, к.т.н., доцент, А.А. Клопотов\*\*\*\*, д.ф.-м.н. проф.*

*\*Томский государственный архитектурно-строительный университет  
634003, г. Томск пл. Соляная, 2, тел. (3822)-65-07-23*

*\*\*Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск пл. Ленина, 30*

*\*\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск пл. Ленина, 36*

*E-mail: klimenov@tpu.ru, klopotovaa@tsuab.ru*

### **1. Введение**

В настоящее время литературе показано, что измельчение зеренной структуры до субмикро - и нанокристаллических состояний в металлах и сплавах приводит к существенному изменению физико-механических свойств (увеличению предела текучести и предела прочности, улучшение трибо-технических характеристик и др.) [1]. Например, в работах [2,3] на титановых сплавах показано монотонное возрастание микротвердости по мере увеличения дисперсности зеренной структуры. В связи с этим, создание на поверхности металлов и сплавов с субмикро - и нанокристаллическими состояниями позволяет провести создание высоких эксплуатационных свойств на поверхности деталей. Одним из перспективных методов в этом направлении является ультразвуковая поверхностная обработка [4]. Очень перспективными в этом направлении являются работы со сплавами на основе титана.

Цель работы провести структурные исследования влияния ультразвуковой обработки на физико-механические свойства и на микроструктуру титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6.

### **2. Материалы и методы исследования**

Для исследования использовали сплавы на основе титана ВТ 1-0 ( $\alpha$ - фаза) ВТ6 ( $\alpha + \beta$ ). Образцы сплавов ВТ 1-0 и ВТ6 выдерживали в течении 1 часа при температурах 680 °С и 750 °С соответственно с последующим охлаждением на воздухе.

Ультразвуковую поверхностную обработку образцов проводили посредством ультразвукового технологического комплекта УЗТК-02. Комплект состоит из ультразвукового генератора УЗГ-02/22 и инструмента в составе: магнитострикционного преобразователя ПМС-063 и индентора. Для этого в резцедержатель станка устанавливали специальный ультразвуковой ударный инструмент (рис. 1). Технические характеристики ультразвукового оборудования: мощность 0,25 кВт; ультразвуковой преобразователь - магнитострикционный; рабочая частота 22 кГц; охлаждение преобразователя - воздушное; расход охлаждающего воздуха 30 м при давлении, не менее 0,3 МПа.

Таблица 1

Режимы механической обработки образцов				
Марка сплава	№ п.п. образца	Скорость резания V, м/мин	Продольная подача резца S, мм/об	Угол при вершине резца $\epsilon$ , град
BT1-0	1	55	0,1	45
	2	55	0,1	60
	3	55	0,1	90
	4	55	0,2	45
	5	55	0,2	60
	6	55	0,2	90
BT6	1	55	0,1	45
	2	55	0,1	60
	3	55	0,1	90
	4	55	0,2	45
	5	55	0,2	60
	6	55	0,2	90

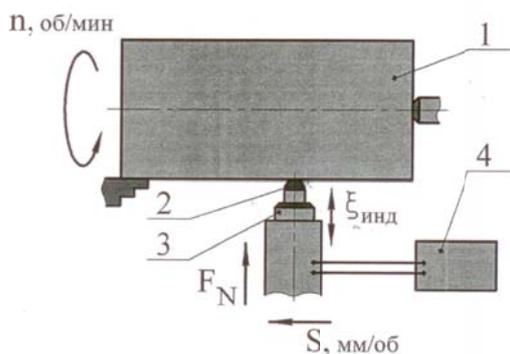


Рис. 1. Схема ультразвуковой поверхностной обработки: 1 - обрабатываемая деталь, 2 - шарик из твердого сплава, 3 - магнитострикционный преобразователь, 4 - ультразвуковой генератор

мого образца, определяли параметры шероховатости: Ra, Rz, Rq, Rp, Rv, Rt, Rsk, Rru, RTr, RHTp.

Металлографическое исследование структуры поверхностей титановых образцов выполнялось на электронном инвертированном универсальном металлографическом микроскопе Axiovert 200 MAT / M MAT (Carl Zeiss).

Электронно-микроскопические исследования структуры титановых сплавов проводили на электронном микроскопе JEM-200FX.

Перед ультразвуковым воздействием титановые образцы механически обрабатывали на токарном станке по режимам, приведенным в таблице. Для формирования угла наклона боковых поверхностей гребней варьировали параметры токарной обработки: продольная подача суппорта S, задающая расстояние между отдельными гребнями формирующегося микрорельефа поверхности и угол при вершине резца.

Для исследования влияния предварительной шероховатости поверхности титановых сплавов на процесс поверхностного упрочнения при ультразвуковой обработке было подготовлено по шесть образцов каждой марки титанового сплава с различной микрогеометрией поверхности. Образцы имели форму цилиндра диаметром 40 мм и высотой 20 мм. Обработке подвергалась наружная цилиндрическая часть образца. Обработку поверхности титановых сплавов проводили разными резцами в зависимости от марки титана (образцы BT1-0 обрабатывались резцами P6M5; образцы BT6 – сплавом BK6).

Микрогеометрия поверхности, образующейся в результате механической обработки, зависит как от геометрической формы инструмента и подачи, так и от других факторов, значительно изменяющих теоретический профиль. К последним относятся: упругие и пластические деформации, тре-

Исследование морфологии и шероховатости поверхности титановых образцов и измерение площади поперечного сечения трека после износа осуществляли с помощью профилометрического комплекса «MICRO MEASURE 3D station» и бесконтактного оптического профилометра NewView 7300.

Упрочнение поверхности титановых образцов оценивали по приросту значений микротвердости при помощи микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 20 г.

С помощью программного обеспечения профилографа, позволяющего регистрировать полученные измерения и проводить их статистическую обработку с получением различных данных о поверхности исследуе-

ние на задней поверхности инструмента, нарост, вибрации и изменение контура лезвия в процессе его износа. Однако в настоящей работе факторы, влияющие на процесс образования микрогеометрии, порождаемые самим процессом резания и факторы, зависящие от оборудования и качества инструмента, были исключены из рассмотрения. В расчет принимали только факторы, определяющие геометрическое формирование остаточного гребешка.

В связи с этим, варьируемыми параметрами при токарной обработке были продольная подача суппорта  $S$ , задающая расстояние между отдельными гребнями формирующегося микрорельефа поверхности и угол  $\delta$  - угол при вершине резца, формирующий наклон боковых поверхностей гребней. Следует отметить, что обработку титанового сплава BT1-0 производили резцом с материалом режущей части выполненной из быстрорежущей стали P6M5. Однако при обработке титанового сплава BT6 вершина выше указанного резца сразу же надламывалась, не позволяя выполнить намеченную обработку. В связи с этим для обработки титанового сплава BT6 резец был заменен на резец с материалом режущей части из твердого сплава марки ВК6.

### 3. Результаты и обсуждение

Индентор под действием статической и динамической силы, создаваемой колебательной системой, пластически деформирует поверхностный слой детали, предварительно обработанный резанием. Обработка поверхности детали производится твердосплавным индентором колеблющимся с ультразвуковой частотой. В зоне локального контакта индентора с обрабатываемой поверхностью возникает очаг пластической деформации, который перемещается вместе с индентором. Все образцы обрабатывали с одинаковыми режимами для того чтобы исключить влияние режимов самой ультразвуковой обработки на структуру формирующегося упрочненного слоя.

Процесс развития пластической деформации при соударении единичного индентора с упруго-пластическим материалом, обладающим известными физико-механическими свойствами и шероховатостью, состоит из трех этапов. На первом этапе нагрузка концентрируется на гребешках микронеровностей, ультраместные напряжения легко переходят границу упругости, и пластическое деформирование материала начинается со смятия вершин микровыступов. Сплошная площадка контакта при этом отсутствует.

На втором этапе с повышением нагрузки пластическое деформирование захватывает группы гребешков, при этом происходит массовое образование микроучастков контакта. Эти микроучастки, в свою очередь, могут быть сплошными или разделены на отдельные площадки в зависимости от общей микрогеометрии поверхности. На отдельных участках пластическое деформирование может сочетаться с упругим деформированием материала в зависимости от формы неровностей, размеров, сочетания в их расположении и, наконец, в зависимости от упругих и пластических свойств самого материала. Третий этап характеризуется началом деформации основания микропрофиля при этом образуется зона сплошного контакта индентора с поверхностью, воспринимающая нагрузку без ощутимых пластических деформаций.

После обработки ультразвуковым инструментом поверхность всех образцов представляет из себя однородный выглаженный микрорельеф с величиной шероховатости  $Rz\ 3,5 \div 5,5$  мкм, практически ни чем не отличающийся друг от друга. Проведенное нами более детальное исследование профилограммы образца из титанового сплава марки BT6 (образец № 2, табл. 1) после ультразвуковой обработки, доказывает выдвинутое предположение о том, что наибольший эффект ультразвуковой обработки достигается именно на гребнях шероховатости, а в ниже лежащих областях он существенно меньше. Так на (рис. 2) отчетливо видны остаточные впадины гребней шероховатости, полученные при механической обработке, которые не претерпели ни каких изменений в процессе ультразвуковой обработки поверхности. Все это свидетельствует о том, что возникает очаг деформации первого рода, который из-за незначительного внедрения инструмента в деталь, приводит лишь к частичному сглаживанию неровностей. Контакт инструмента с заготовкой в данном случае имеет прерывистый характер. Среднее значение микротвердости титанового сплава BT1-0 равно 2400 МПа [5]. Измерения микротвердости образцов титанового сплава BT1-0, прошедших ультразвуковую обработку, показали, что существует значительный разброс ее средней величины в интервале значений от 3200 МПа до 4000 МПа. Этот разброс зависит от формы и размеров рельефа шероховатости. Аналогичная ситуация имеет место и измерении микротвердости образцов титанового сплава BT6.

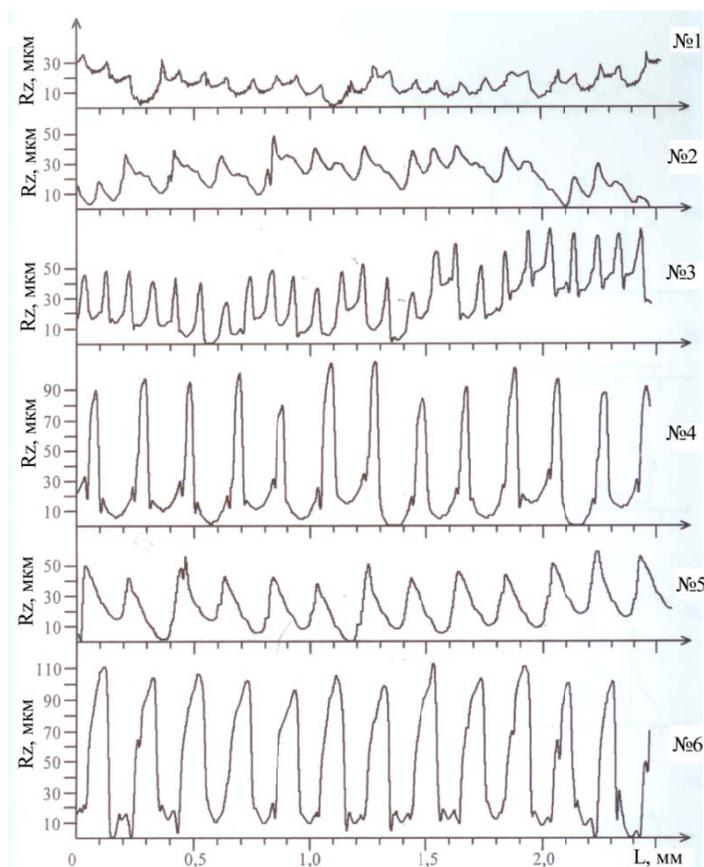


Рис. 2. Профилограммы поверхности образцов после механической обработки сплава ВТ 1-0

Анализ профилограмм образцов титанового сплава ВТ1-0 показал, что в результате механической обработки образуется регулярный микрорельеф поверхности с величиной шероховатости от  $Rz = 5$  мкм до  $Rz = 100$  мкм, состоящий из последовательно расположенных гребней и впадин определенной высоты с постоянным шагом (рис. 3). Регулярность профиля имеет большое значение при формировании упрочненных поверхностей, поскольку она обеспечивает постоянство свойств обработанной поверхности по всей площади контакта.

Установлено, что микрорельеф поверхности образцов титанового сплава марки ВТ6, полученных на одних и тех же режимах механической обработки, имеет заметно меньшую шероховатость поверхности по сравнению с образцами из титанового сплава ВТ 1-0. Данный факт можно объяснить тем, что с уменьшением пластичности металл меньше деформируется, уменьшается нарост, уменьшаются вибрации и в результате повышается класс чистоты обрабатываемой поверхности.

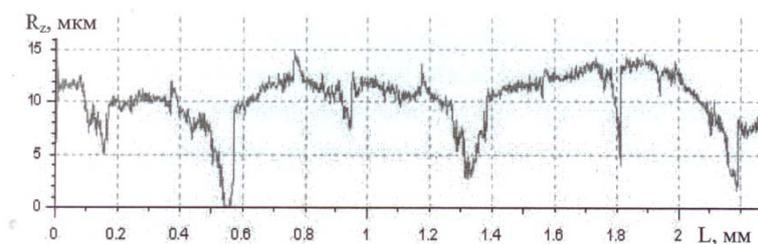


Рис. 3. Профилограмма поверхности образца титанового сплава ВТ6 после ультразвуковой обработки

На рис. 4 представлены результаты исследований микротвердости  $H_{\mu}$  титановых сплавов от исходной шероховатости поверхности. Анализ этих зависимостей с учетом значительного разброса значений  $H_{\mu}$  позволяют сделать вывод, что увеличение шероховатости приводит к росту микротвердости. Это приводит к тому, что наибольшее увеличение значений поверхностной микротвердости обладают образцы с наибольшей исходной шероховатостью.

Для исследования распределения микротвердости по глубине образца были подготовлены поперечные металлографические шлифы. Исследованию подвергались образцы каждой марки титанового сплава, имеющие наибольшую микротвердость.

Анализ полученных данных для титанового сплава ВТ 1-0 позволило установить, что ультразвуковая обработка поверхностного слоя приводит к градиентному увеличению значений микротвердости от и исходного 2400 МПа до 4000 МПа на его поверхности. При этом величина переходной зоны составляет около 120 мкм (рис. 5).

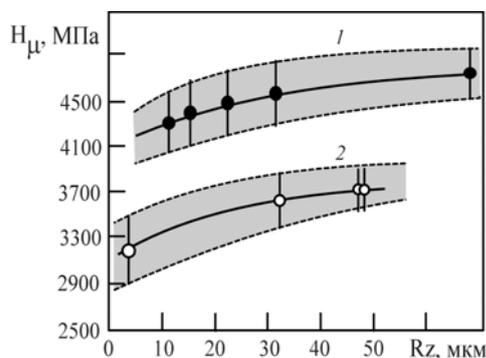


Рис. 4. Зависимость микротвердости от шероховатости сплавов ВТ6 (кривая 1) ВТ1-0 (кривая 2). Серым цветом выделена область изменения микротвердости с учетом ошибки измерения

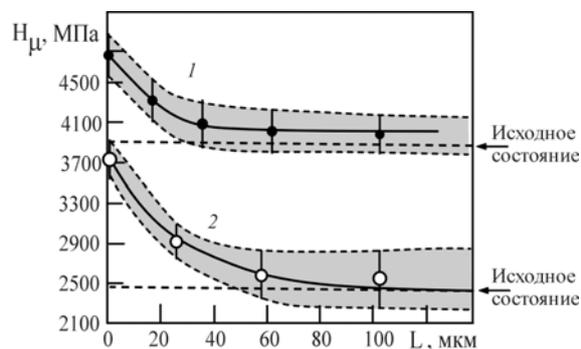


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине от обработанной ультразвуком поверхности: 1 - ВТ6; 2 - ВТ 1-0. Серым цветом выделена область изменения микротвердости с учетом ошибки измерения

Исследование образца из титанового сплава ВТ6 позволило установить, что ультразвуковое модифицирование поверхностного слоя приводит к градиентному увеличению значений микротвердости от исходного 4000 МПа до 5400 МПа на его поверхности. Несмотря на то, что при обработке титанового сплава ВТ6 эффект упрочнения от ультразвуковой обработки несколько меньше и составляет 1400 МПа, величина переходной зоны, в которой наблюдается монотонное убывание микротвердости, существенно меньше и составляет порядка 40 мкм.

Металлографические исследования структуры поверхностного слоя титанового сплава ВТ1-0 после механической обработки показали, что механическая обработка поверхности приводит к образованию дефектной структуры. На микрофотографии (рис. 6) видно, что зерна вытянуты по направлению движения режущего инструмента. Здесь зерна, как бы повторяют контур гребня шероховатости сформированного режущим инструментом.

Исследования структуры поверхностного слоя титанового сплава ВТ1-0 после ультразвуковой обработки показало ее сильное измельчение с текстурой, также направленной в направлении продольной подачи движения индентора. Величина этого поверхностного слоя и измельченной структурой составляет величину порядка 100 мкм. В результате исследования структуры поверхностного слоя титанового сплава ВТ1-0 после ультразвуковой обработки установлено, что поверхностный слой образца имеет сильно измельченную структуру с текстурой, так же направленной в направлении продольной подачи движения индентора. Это свидетельствует о том, что структура претерпела значительные изменения в результате ультразвуковой обработки. Степень измельчения зеренной структуры весьма существенная, о чем свидетельствуют приведенные микрофотографии (рис. 6)

Электронно-микроскопические исследования образцов из титанового сплава ВТ1-0 с наибольшей микротвердостью позволили установить, что обработанные ультразвуком поверхности имеют неоднородную по объему микроструктуру. Средний размер элементов структуры на самой поверхности образца имеют размеры порядка 100 нм. При удалении от поверхности средний размер элементов структуры увеличивается до 200 нм с последующим ростом до обычного крупнозернистого состояния.

Подобные электронно-микроскопические исследования обработанных ультразвуком образцов из титанового сплава ВТ6 с наибольшей микротвердостью показали, что микроструктура так же неоднородна по объему в приповерхностной области. Средний размер элементов структуры на самой поверхности образца в среднем равен 50 нм. При удалении от поверхности средний размер элементов структуры увеличивается до 120 нм и при дальнейшем удалении достигает обычной крупнозернистой структуры.



Рис. 6. Металлографическое изображение поверхности титанового сплава ВТ1-0 после механической обработки (а) и после последующей ультразвуковой обработки (б)

#### Заключение

1. Установлено наличие зависимости между исходной шероховатостью поверхности титановых сплавов и микротвердостью после ультразвуковой обработки. Микротвердость титановых сплавов после ультразвуковой обработки возрастает с повышением исходной шероховатости поверхности.

2. Показано, что увеличение исходной шероховатости поверхности титановых сплавов до 80 мкм позволяет в результате ультразвуковой обработки сформировать в поверхностном слое структуру со средним размером элементов 100 нм для титанового сплава ВТ1-0 и 50 нм для титанового сплава ВТ6.

*Работа выполнена при финансовой поддержке работ по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.*

*В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта проекта Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 8.1.42.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. и по государственному заданию в сфере научной деятельности (проект №11.351.2014/К)*

#### Литература.

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. 398с.
2. Белый А.В., Кукареко В.А., Кононов А.Г., Копылов В.И., Шаркеев Ю.П. Структура и триботехнические свойства субмикроструктурного титана, модифицированного ионами азота. // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. – №6. – С.571-577.
3. Лебедев В.А., Стрельцова И.П. Закономерности формирования и упрочнения поверхностного слоя динамическими методами. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №7. – С.7-12.
4. Klimentov V.A., Kovaievskaya Zn.G., Borozna V.Yu., Sun Zeming, Zhu Qifang. Nano-crystallization surface treatment of titanium alloys // RARE METALS Vol. 28, Spec. Issue, Oct 2009, p.195-198.
5. Борозна В.Ю. Зависимость степени упрочнения поверхности титанового сплава ВТ1-0 при ультразвуковой обработке от исходной шероховатости // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: ТПУ. – 2009. – Т.3. – С. 472-474.