06

Формирование дефектного поверхностного слоя на сверхупругом сплаве Ti−18Zr−15Nb медицинского назначения методом ультразвуковой обработки

© *Т.О. Теплякова, Т.С. Сухова, А.С. Конопацкий*

Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“, Москва, Россия
E-mail: konopatskiy@misis.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 6 апреля 2026 г.
Принято к публикации 9 апреля 2026 г.

Использование ультразвука высокой интенсивности открывает возможность создания универсального инструмента для модификации поверхности металлических материалов. Изучено влияние параметров ультразвуковой обработки на формирование пористого слоя на поверхности сверхупругого сплава Ti−18Zr−15Nb. Анализ методом сканирующей электронной микроскопии позволил установить, что при выборе оптимальных параметров ультразвуковой обработки на поверхности сплава формируется однородная область с характерной пористой структурой.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, сверхупругие сплавы, пористая структура.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63149.20660

За последние десятилетия ультразвуковая обработка заняла важное место среди методов модификации поверхности металлических материалов. Исследования показывают ее эффективность для сплавов на основе титана, алюминия, жаропрочных сплавов и углеродистых сталей [1]. Ультразвуковое воздействие в жидкой среде генерирует кавитационные пузырьки, схлопывание которых создает локальные области высокого давления и температуры. Механический импульс формирует на поверхности металла дефектный пористый слой [2].

Ультразвуковая обработка представляет собой высокоэффективную альтернативу традиционным методам модификации поверхности металлов [3]. Ее ключевыми преимуществами являются высокая производительность, доступность оборудования и простота реализации процесса.

Формирование дефектной пористой структуры поверхности металлических имплантатов с использованием ультразвуковой обработки решает две ключевые задачи. Во-первых, повышенная шероховатость поверхности способствует росту адгезии и пролиферации клеток, что ускоряет остеоинтеграцию и снижает риск отторжения изделия [4,5]. Во-вторых, при определенных условиях такая поверхность может проявлять антибактериальные свойства, механически повреждая бактериальные клетки и препятствуя формированию биопленок [6,7], что критически важно для профилактики имплант-ассоциированных инфекций. Кроме того, создаваемый ультразвуком дефектный поверхностный слой может быть использован для инкорпорирования в него антибактериальных частиц.

Титановые сплавы широко применяются в медицине благодаря высокому соотношению прочности и коррозионной стойкости, а также низкому модулю упругости [8,9]. В частности, сверхупругий сплав Ti−18Zr−15Nb считается одним из наиболее перспективных материалов для костных имплантатов [10,11]. Его преимущества включают повышенную биосовместимость, высокий кристаллографический ресурс обратимой деформации ($\sim 6\,\%$) и увеличенный срок службы при циклических нагрузках [12].

Данное исследование направлено на установление возможности формирования поверхностного пористого слоя сплава Ti−18Zr−15Nb методом ультразвукового воздействия в водной среде.

В качестве объекта для модификации поверхности был выбран сверхупругий сплав Ti−18Zr−15Nb. Образцы имели цилиндрическую форму высотой 2 mm и диаметром 10 mm. Поверхность образцов была подготовлена путем последовательной шлифовки на абразивной бумаге (зернистость SiC от P320 до P4000) и последующей полировки с применением суспензии Al_2O_3 (дисперсность $1-3\,\mu$m).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Обработку проводили в стеклянном лабораторном стакане, который был размещен в водоохлаждаемом металлическом кожухе для предотвращения нагрева и поддержания температуры среды около 20 °C. Для надежной фиксации подложки был спроектирован и изготовлен полимерный держатель, который крепился на дне стакана и предотвращал смещение образца под воздействием ультразвуковой обработки. В качестве рабочей среды использовали дистиллированную воду (объем 500 ml). В каждом эксперименте образец погружали в воду и варьировали расстояние от его поверхности до излучателя путем перемещения сонотрода на штативе. Глубина погружения сонотрода составляла от 3 до 10 cm. В качестве излучателя использовали

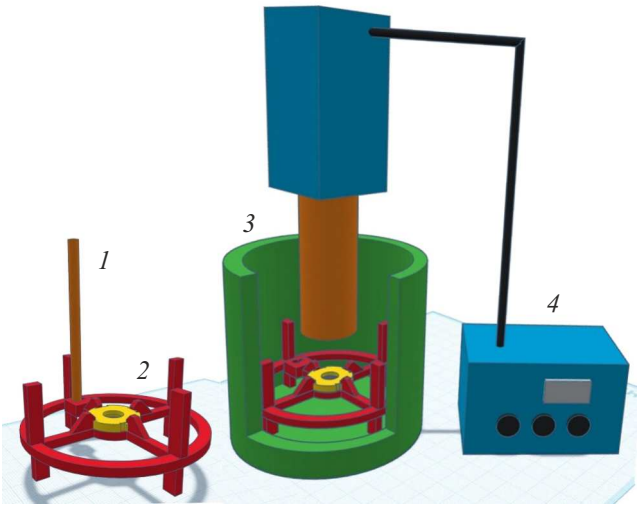


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. *1* — держатель для образца, *2* — образец, *3* — емкость для постоянного охлаждения, *4* — ультразвуковой гомогенизатор.

титановый пруток диаметром 40 mm с гладкой рабочей поверхностью. Ультразвуковую обработку проводили в течение 30 min при мощности 350 W и амплитуде 20 % (это соответствует колебаниям сонотрода на величину до $\sim 5\,\mu$m), используя генератор Hielscher Ultrasound Technology UIP 1000 hdT. Сонотрод располагали соосно образцу на расстоянии 2, 5 или 7 cm от его поверхности. Шаг расстояний был выбран с запасом для перекрытия возможного диапазона интерференционных эффектов ультразвуковых волн.

Фазовый состав анализировали на дифрактометре Rigaku Miniflex 600 (CuK_α-излучение) в диапазоне $2\theta = 20-90^\circ$ с шагом 0.1° и выдержкой 3 s. Морфологию поверхности исследовали на автоэмиссионном растровом электронном микроскопе Scios (FEI) в режиме вторичных электронов. Анализ распределения пор по размерам проводили методом случайных секущих.

На рис. 2 представлены дифрактограммы исходного (a) и подвергнутого ультразвуковой обработке (b) сплава. Основной фазой во всех образцах является объемноцентрированная кубическая β-фаза. Также присутствуют следы равновесной α-фазы (обусловлены технологией получения сплава) и мартенситной α''-фазы. Присутствие метастабильной мартенситной фазы вызвано деформацией наклепом поверхности сплава при механической полировке [13]. Согласно приведенным дифрактограммам, ультразвуковая обработка не оказывает влияния на фазовый состав материала, в частности не приводит к росту содержания мартенситной фазы.

Результаты исследования морфологии поверхности материалов, модифицированных ультразвуковым воздействием, представлены на рис. 3. Было установлено, что характер формирующегося пористого слоя зависит от расстояния между сонотродом и образцом.

На рис. 3, a представлена поверхность образца, обработанного на расстоянии 2 cm от сонотрода. При анализе поверхности с применением малого увеличения было установлено, что формирование дефектов происходит преимущественно на периферии образца, при этом образуется кольцеобразная область вокруг центральной части, которая сохранила исходное состояние после шлифовки. Граница раздела между дефектной и исходной областями отчетливо различима (рис. 3, d). Дефект-

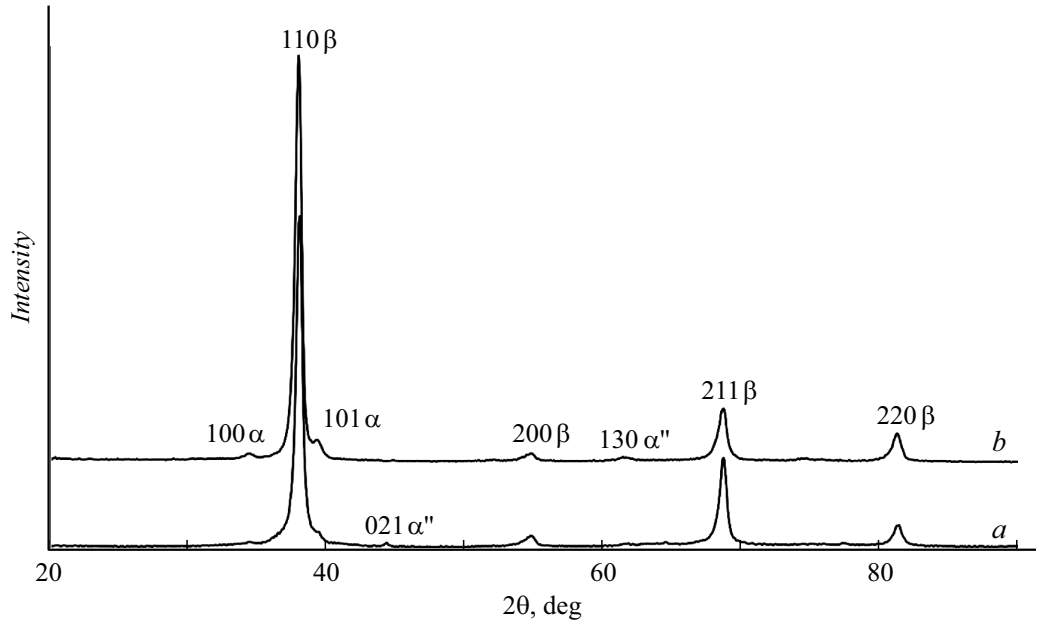


Рис. 2. Дифрактограммы образцов сплава в исходном состоянии (a) и после обработки поверхности при помощи ультразвукового воздействия (b).

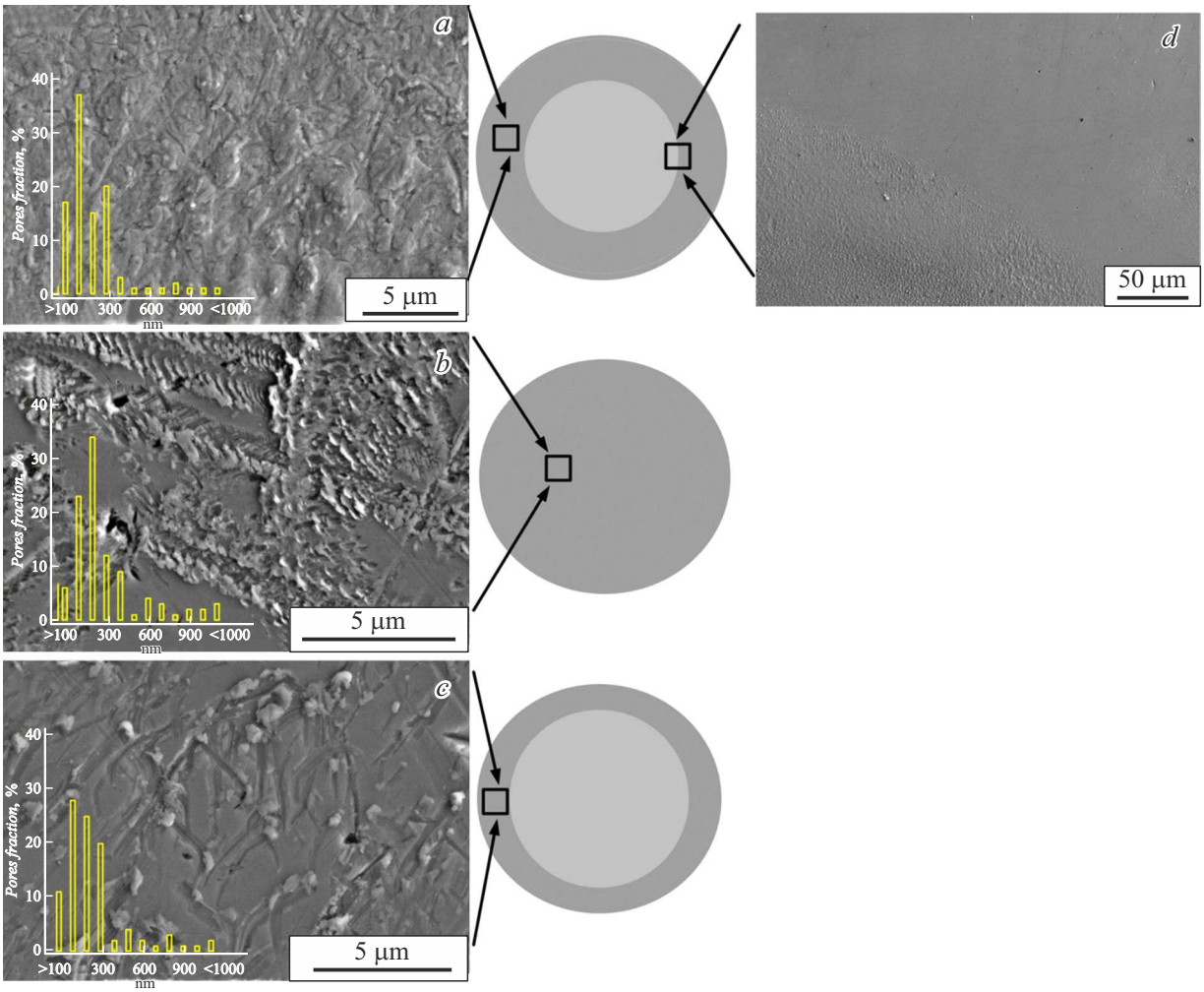


Рис. 3. Микрофотографии поверхности образца и гистограммы распределения пор по размерам после ультразвукового воздействия на расстоянии 2 (*a*, *d*), 5 (*b*) и 7 cm (*c*).

ная структура в обработанной зоне преимущественно проявляется в виде неровностей на поверхности, а также представлена редкими субмикронными порами.

Поверхность образца после модификации на расстоянии 7 cm представлена на рис. 3, *c*. Как и в случае обработки на расстоянии 2 cm, дефекты формируются не по всей поверхности, а преимущественно по периферии, образуя кольцевую зону. Однако характер дефектной структуры при этом изменяется. Наблюдается увеличение размеров пор и неровностей: поры приобретают размеры в микронном диапазоне, а поверхностные неровности, хотя и схожи по типу с наблюдаемыми для образца, обработанного на расстоянии 2 cm, становятся более протяженными и широкими.

Поверхность образца, обработанного на расстоянии 5 cm от сонотрода, представлена на рис. 3, *b*. В данном случае в отличие от предыдущих режимов практически вся поверхность образца (за исключением периферийных зон, прилегающих к держателю) была подвергнута равномерной модификации. Дефектная структура представлена преимущественно скоплениями пор в микронном и субмикронном диапазонах. Помимо этого наблюдаются субмикронные линейные дефекты, выстраивающиеся в характерные полосы. Обработка в данном режиме позволила достичь наиболее однородной и равномерно распределенной пористой структуры на всей поверхности. Распределение пор по размерам показывает, что наибольшая доля пор находится в диапазоне размеров от нескольких десятков нанометров до 500 nm.

Полученные результаты демонстрируют, что варьирование расстояния между сонотродом и поверхностью образца в диапазоне от 2 до 7 cm является эффективным способом управления морфологией формируемого пористого слоя. Наблюдаемая нелинейная зависимость морфологии и однородности пористого слоя от расстояния излучатель–образец свидетельствует о сложном характере взаимодействия ультразвукового поля с поверхностью образца. Равномерная модификация поверхности при расстоянии 5 cm от сонотрода в отличие от периферийного характера обработки при 2 и 7 cm мо-

жет быть связана с пространственным распределением акустического давления у поверхности образца, которое определяется как параметрами излучающей системы, так и геометрией рабочей камеры.

Таким образом, в рамках настоящей работы была продемонстрирована возможность модификации поверхности сверхупругого сплава Ti−18Zr−15Nb методом ультразвукового воздействия, приводящей к формированию дефектной структуры. Показано, что тип и распределение пор зависят от параметров процесса. Было установлено, что данная обработка не оказывает влияния на фазовый состав материала. Показано, что расположение сонотрода на расстоянии 5 cm от поверхности образца позволяет сформировать наиболее однородную дефектную поверхность с контролируемой морфологией (поры и линейные дефекты), равномерно распределенную по всей площади образца. Данная обработка является перспективной для формирования поверхностей, обладающих потенциалом повышения биосовместимости сплава.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 22-79-10299-П, https://rscf.ru/project/22-79-10299-П/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] О.В. Абрамов, И.Г. Хорбенко, Ш. Швегла, *Ультразвуковая обработка материалов* (Машиностроение, М., 1984).
[2] W. Tan, H. Zhao, N. Ren, J. Li, G. Li, G. Wang, F. Wei, R.I. Boughton, H. Liu, Ultrason. Sonochem., **20** (1), 216 (2013). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.020
[3] К.В. Зайцев, А.С. Аралкин, Современные проблемы науки и образования, № 3, 94 (2014).
[4] D. Farronato, F. Mangano, F. Briguglio, V. Iorio-Siciliano, F. Riccitiello, R. Guarnieri, Int. J. Periodont. Restor. Dent., **34** (1), 79 (2014). DOI: 10.11607/prd.1747
[5] V. Veiko, Y. Karlagina, T. Itina, D. Kuznetsova, V. Elagin, E. Zagaynova, G. Chernenko, E. Egorova, C. Zernitskaia, S. Manokhin, A. Tokmacheva-Kolobova, G. Odintsova, Opt. Laser Technol., **138**, 106871 (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106871
[6] A. Ali, A. Waris, M.A. Khan, M. Asim, A.U. Khan, S. Khan, J. Zeb, Life Sci., **314**, 121332 (2023). DOI: 10.1016/j.lfs.2022.121332
[7] M. Niinomi, J. Mech. Behav. Biomed. Mater., **1** (1), 30 (2008). DOI: 10.1016/j.jmbbm.2007.07.001
[8] M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Prog. Mater. Sci., **54** (3), 397 (2009). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.06.004
[9] Q. Chen, G.A. Thouas, Mater. Sci. Eng. R, **87**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.mser.2014.10.001
[10] H.Y. Kim, J. Fu, H. Tobe, J.I. Kim, S. Miyazaki, Shape Mem. Superelast., **1**, 107 (2015). DOI: 10.1007/s40830-015-0022-3
[11] A.S. Konopatsky, T.O. Teplyakova, D.V. Popova, K.Yu. Vlasova, S.D. Prokoshkin, D.V. Shtansky, Coll. Surf. B, **209**, 112183 (2022). DOI: 10.1016/j.colsurfb.2021.112183
[12] A.S. Konopatsky, S.M. Dubinskiy, Yu.S. Zhukova, V. Sheremetyev, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, M.R. Filonov, Mater. Sci. Eng. A, **702**, 301 (2017). DOI: 10.1016/j.msea.2017.07.046
[13] A. Baranova, S. Dubinskiy, I. Vvedenskaya, A. Bazlov, N. Tabachkova, V. Sheremetyev, T. Teplyakova, O. Strakhov, S. Prokoshkin, Appl. Sci., **14** (9), 3647 (2024). DOI: 10.3390/app14093647