



## Определение оптимального режима точения ультрамелкозернистых титановых сплавов системы TiNbZr методом Тагучи

В.П. Кузнецов<sup>1✉</sup>, Д.С. Гончаров<sup>2</sup>, О.Г. Блинков<sup>3</sup>, Ю.П. Шаркеев<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

**Резюме.** Целью данного исследования является оптимизация режимов точения сплавов системы Ti-Nb-Zr для минимизации шероховатости поверхности. Объектом исследования служили заготовки из двух ультрамелкозернистых титановых сплавов с номерами плавов 92 и 94 системы Ti-Nb-Zr. Для повышения механических свойств за счет получения УМЗ-структуры в заготовках использовался метод АВС-прессования с последующей ручьежкой. Планирование эксперимента было проведено с использованием метода ортогональных матриц Г. Тагучи, что позволило ранжировать параметры технологического процесса точения по степени их влияния на выходную характеристику процесса. В ходе эксперимента определены оптимальные значения режимов точения для достижения минимальной величины шероховатости поверхности ультрамелкозернистых титановых сплавов. Установлено, что наименьшее значение шероховатости поверхности достигается при скорости резания 60 м/мин и подаче 0,07 мм/об для сплава 94, содержащем в качестве легирующих элементов олово и тантал, а также скорости резания 30 м/мин и подаче 0,07 мм/об для сплава 92 без содержания олова и тантала, при этом максимальное влияние на шероховатость оказывает скорость резания. Для образцов с наименьшей шероховатостью поверхности определены значения микротвердости поверхностного слоя: для сплава 92 – среднее значение микротвердости  $HV_{0,05}$  составило 321 HV, для сплава 94 – 252 HV. Микротвердость сплава 92, не содержащего олова и тантала, увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением 280 HV. Таким образом, сочетания режимов точения, установленные в ходе исследования, можно назвать оптимальными для достижения минимальной шероховатости поверхности сплавов 92 и 94 системы Ti-Nb-Zr. Оптимальные режимы точения применены при изготовлении имплантов для остеointеграционного протезирования. В будущем планируется проведение исследования по определению оптимальной комбинации технологических параметров процесса резьбонарезания при изготовлении биомедицинских имплантатов из сплавов системы Ti-Nb-Zr.

**Ключевые слова:** ультрамелкозернистые титановые сплавы, шероховатость поверхности, поверхностное упрочнение, метод Тагучи

**Финансирование.** Работа выполнена в молодежной лаборатории модификации поверхностей материалов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-03-2025-258 от 17.01.2025 (№ темы FEUZ-2024-0020)

**Для цитирования:** Кузнецов В.П., Гончаров Д.С., Блинков О.Г., Шаркеев Ю.П. Определение оптимального режима точения ультрамелкозернистых титановых сплавов системы TiNbZr методом Тагучи // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-466-476>. EDN: XBITUE.

## Optimization of turning parameters for ultrafine grained Ti–Nb–Zr alloys using the Taguchi method

Viktor P. Kuznetsov<sup>1✉</sup>, Dmitrii S. Goncharov<sup>2</sup>, Oleg G. Blinkov<sup>3</sup>, Yurii P. Sharkeev<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>1</sup>National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Ortopaedics, Kurgan, Russia

**Abstract.** This study aimed to optimize turning parameters for Ti–Nb–Zr alloys in order to minimize surface roughness. Billets of two ultrafine-grained (UFG) titanium alloys, melt batches 92 and 94 of the Ti–Nb–Zr system, were investigated. To enhance mechanical properties, we produced a UFG structure by abc-pressing of billets followed by groove rolling. Experimental design employed the Taguchi method of orthogonal arrays, which enabled ranking of the technological parameters of the turning process according to their influence on the output characteristics. The experiment determined the optimal turning parameters for achieving minimal surface roughness in UFG titanium alloys. The lowest surface roughness was achieved at a feed rate of 0.07 mm/rev. The cutting speed was 60 m/min for alloy 94, which contained tin and tantalum as alloying elements, and 30 m/min for alloy 92, which contained neither tin nor tantalum. Cutting speed was found to exert the greatest influence on surface roughness. For the samples with the lowest surface roughness, the microhardness of the surface layer was measured. The average microhardness HV<sub>0.05</sub> was 321 HV for alloy 92 and 252 HV for alloy 94. The microhardness of alloy 92 increased by 14.6% compared to its initial value of 280 HV. Thus, the turning parameters established in this study can be considered optimal for achieving minimal surface roughness in alloys 92 and 94 of the Ti–Nb–Zr system. The optimized turning parameters were applied in the fabrication of implants for osseointegration prosthetics. Future work will focus on determining the optimal combination of technological parameters for the thread-cutting process in the manufacture of biomedical implants from Ti–Nb–Zr alloys.

**Keywords:** ultrafine-grained titanium alloys, surface roughness, surface hardening, Taguchi method

**Funding.** This work was carried out at the Youth Laboratory for Material Surface Modification at the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin under agreement with the Ministry of Science and Higher Education Russian Federation No. 075-03-2025-258 of January 17, 2025 (subject no. FEUZ-2024-0020).

**For citation:** Kuznetsov V.P., Goncharov D.S., Blinkov O.G., Sharkeev Yu.P. Optimization of turning parameters for ultrafine grained Ti–Nb–Zr alloys using the Taguchi method. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-466-476>. EDN: XBITUe.

## ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы являются основным материалом, используемым при изготовлении биомедицинских изделий для искусственной замены твердых тканей – ортопедических изделий, зубных имплантатов. В настоящее время широкое распространение получили Ti–Al–V сплавы, однако при их длительном использовании наблюдаются токсическое воздействие на организм человека и аллергические реакции [1]. Кроме того, сплавы на основе Ti–Al–V обладают гораздо более высоким модулем упругости, порядка 100...120 ГПа, по сравнению с костной тканью (15...55 ГПа), что вызывает поздние осложнения в виде отторжения импланта или резорбции костной ткани [2].

Значительные усилия предпринимаются для разработки и исследования биомедицинских сплавов с низким модулем Юнга [3]. Для предотвращения явления резорб-

ции костной ткани необходим низкий модуль Юнга, эквивалентный модулю упругости кортикального слоя кости. Регулируя количество β-стабилизирующих элементов, таких как Nb, Ta, Zr, можно снизить риск отторжения имплантата за счет снижения модуля упругости [4–6].

Ультрамелкозернистые (УМЗ) сплавы системы Ti–Nb–Zr, обладая высокими механическими свойствами, такими как прочность, пластичность и твердость, важными для медицинских изделий, относятся к труднообрабатываемым материалам. В научных работах, посвященных исследованию обрабатываемости титановых сплавов системы Ti–Nb–Zr, особое внимание уделяется изучению анизотропии свойств титановых образцов [7], повышению производительности при обработке биомедицинских изделий из титановых сплавов [8], улучшению качества поверхности [9] и разработке методов