

Научная статья

УДК 621.941.01

EDN: XBITUE

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-466-476



## 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 плавок 92 и 94 системы Ti-Nb-Zr. Для повышения механических свойств за счет получения УМЗ-структуры в заготовках использовался метод АВС-прессования с последующей ручьевой прокаткой. 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 остеоинтеграционного 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

оценки качества поверхности [10]. Понимание особенностей обработки данных сплавов, в частности влияния режимов точения на качество обработанной поверхности и упрочнение поверхностного слоя, позволит оптимизировать условия обработки, повысить производительность и экономическую эффективность процесса производства биомедицинских изделий.

Целью данного исследования является оптимизация режимов точения сплавов системы Ti-Nb-Zr для минимизации шероховатости поверхности.

Постановка эксперимента проводилась с использованием метода Г. Тагучи. Метод обеспечивает системность, простоту и в то же время эффективность решения поставленной задачи с точки зрения минимизации затрат на достижение желаемого результата. Данный метод широко применяется при качественном исследовании свойств поверхности и оптимизации технологических параметров обработки сверлением [11–13], наноструктурирующим выглаживанием [14–16], точением [17, 18] и т.д. Следует отметить, что в ряде случаев проведение полнофакторного эксперимента оправдано, однако требует больших материальных затрат.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования служили заготовки из титановых сплавов системы Ti-Nb-Zr. Для повышения механических свойств за счет получения УМЗ-структуры в заготовках использовался метод АВС-прессования, при котором заготовка последовательно осаживалась в трех взаимно перпендикулярных направлениях (А, В и С) с последующей ручьевогой прокаткой. Реализация метода осуществлялась в лаборатории нанострук-

турных биоконпозитов Института физики прочности и материаловедения СО РАН [19]. Химический состав образцов сплавов представлен в табл. 1.

Точение проводилось на токарном обрабатывающем центре OKUMA GENOS L300-M. В качестве инструмента использовалась сменная многогранная пластина CNMG 120408-VP2 (Korloy, Корея), обработка велась с подводом смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

Эксперимент по определению оптимального режима финишного точения проводился на основе метода ортогональных матриц и аддитивной модели совокупного влияния входных контролируемых параметров на выходную характеристику процесса (отклик). В качестве выходной характеристики был принят параметр шероховатости поверхности после точения  $Ra$ . Входными параметрами процесса являлись скорость резания  $V_c$  м/мин и подача  $f$  мм/об. Каждый параметр имел 3 дискретных значения (уровня). Контролируемые параметры процесса и числовые значения уровней для сплавов 92 и 94 приведены в табл. 2.

В соответствии с числом технологических параметров и их уровнями была выбрана ортогональная матрица Тагучи L9. Формализованное представление матрицы L9 и план эксперимента представлены в табл. 3.

Анализ результатов эксперимента и ранжирование технологических параметров по степени их влияния на выходную характеристику процесса выполнены в программном комплексе MiniTab 19. Поскольку целью эксперимента был поиск оптимального сочетания технологических параметров процесса для достижения минимального значения выходной характеристики процесса, расчет от-

**Таблица 1.** Химический состав заготовок образцов сплавов системы Ti-Nb-Zr

**Table 1.** Chemical composition of alloy samples of the Ti-Nb-Zr system

№ образцов	Ti	Nb	Zr	Fe	Sn	Ta
92	55,302	39,5	5,23	0,029	-	-
94	51,38	39,1	5,35	0,039	2,12	1,98

**Таблица 2.** Параметры точения и их уровни

**Table 2.** Turning parameters and their levels

Параметр		Уровни		
		1	2	3
A	Скорость резания $V_c$ , мм/мин	30	60	90
B	Подача $f$ , мм/об	0,03	0,05	0,07

**Таблица 3.** Ортогональная матрица Тагучи L9 и план эксперимента  
**Table 3.** Taguchi L9 orthogonal matrix and an experimental plan

№ эксперимента	Ортогональная матрица Тагучи L9		Параметры эксперимента	
	A	B	Vc, мм/мин	f, мм/об
1	1	1	30	0,03
2	1	2	30	0,05
3	1	3	30	0,07
4	2	1	60	0,03
5	2	2	60	0,05
6	2	3	60	0,07
7	3	1	90	0,03
8	3	2	90	0,05
9	3	3	90	0,07

ношения сигнал/шум в  $i$ -том эксперименте  $SN_i$  проводился по формуле:

$$SN_i = -10 \log \left[ \sum_{n=1}^{N_i} \frac{y_n^2}{N_i} \right], \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер эксперимента;  $n$  – порядковый номер измерения в эксперименте;  $N_i$  – количество измерений в  $i$ -том эксперименте;  $y_n$  – среднее значение измеренной выходной величины в  $i$ -том эксперименте.

Для определения параметров шероховатости поверхности использовался оптический 3D-профилометр WYKO NT-100 (США).

Микротвердость поверхностного слоя измерялась при помощи микротвердомера АНОТЕСН ЕсоHARD FM300 (Германия) при нагрузке на индентор 0,49 Н. Для исследования микротвердости по глубине поверхностного слоя из цилиндрического образца изготавливались поперечные шлифы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения оптимального режима точения было проведено по пять измерений шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности в каждом эксперименте после обработки девяти образцов заготовок из сплава 92 и девяти образцов из сплава 94 с различными комбинациями скорости резания  $Vc$  и подачи  $f$  в соответствии с ортогональным массивом L9 (см. табл. 3). Среднее значение шероховатости и отношение сигнал/шум  $SN$ , рассчитанное по формуле (1) для каждого эксперимента, приведены в табл. 4 и 5.

Результаты измерений параметров поверхностного слоя образцов сплавов 92 и 94 с наименьшими значениями шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  представлены на рис. 1 (а, б).

Ранжирование параметров процесса по значению отношения сигнал/шум  $SN$  выполнено в программе MiniTab 19 и показано в табл. 6 и 7, где  $\Delta$  – разность между макси-

**Таблица 4.** Средние значения шероховатости поверхности  $Ra$  и расчетные значения отношения сигнал/шум  $SN$  для сплава 92

**Table 4.** Average values of surface roughness  $Ra$  and calculated values of signal-to-noise ratio  $SN$  for alloy 92

№ эксперимента	Параметры эксперимента		Шероховатость $Ra$ , мкм					Среднее $Ra$ , мкм	$SN$
	Vc, мм/мин	f, мм/об	1	2	3	4	5		
1	30	0,03	0,625	0,705	0,526	0,59	0,495	0,5882	4,540868
2	30	0,05	0,566	0,604	0,485	0,436	0,491	0,5164	5,681302
3	30	0,07	0,81	0,694	0,52	0,587	0,5	0,6222	3,97353
4	60	0,03	1,14	1,1	0,974	1,52	1,37	1,2208	-1,8444
5	60	0,05	0,927	0,761	0,727	0,736	0,73	0,7762	2,158715
6	60	0,07	0,49	0,541	0,478	0,457	0,45	0,4832	6,298149
7	90	0,03	0,656	1,06	0,741	0,881	1,01	0,8696	1,079858
8	90	0,05	0,88	0,738	0,938	0,734	0,757	0,8094	1,790511
9	90	0,07	0,884	0,671	0,802	1,06	0,795	0,8424	1,390005

**Таблица 5.** Средние значения шероховатости поверхности  $Ra$  и расчетные значения отношения сигнал/шум SN для сплава 94

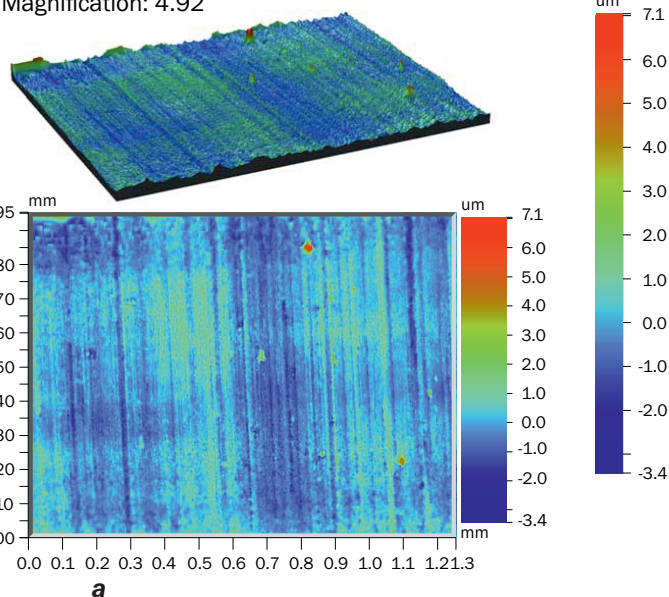
**Table 5.** Average values of surface roughness  $Ra$  and calculated values of signal-to-noise ratio SN for alloy 94

№ эксперимента	Параметры эксперимента		Шероховатость $Ra$ , мкм					Среднее $Ra$ , мкм	SN
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об	1	2	3	4	5		
1	30	0,03	0,748	1,1	1,9	1,88	1,37	1,3996	-3,34084
2	30	0,05	0,83	0,75	0,71	0,746	0,6	0,7272	2,721309
3	30	0,07	0,65	0,55	0,53	1,24	0,47	0,688	2,573691
4	60	0,03	0,5	0,44	0,54	0,56	0,54	0,516	5,717356
5	60	0,05	0,77	0,7	0,64	0,63	0,7	0,688	3,225025
6	60	0,07	0,72	0,65	0,68	0,69	0,68	0,684	3,294202
7	90	0,03	0,67	0,87	0,81	0,63	1,05	0,806	1,724627
8	90	0,05	1,54	1,8	1,23	0,8	0,48	1,17	-2,03843
9	90	0,07	0,9	0,8	0,75	0,77	0,68	0,78	2,12143

**Surface Stats:**

**Ra:** 490.19 nm    **Sa:** 490.08 nm  
**Rq:** 640.75 nm    **Sq:** 640.66 nm  
**Rz:** 8.04  $\mu\text{m}$     **Sz:** 5.16  $\mu\text{m}$   
**Rt:** 10.48  $\mu\text{m}$   
**Rp:** 7.05  $\mu\text{m}$   
**Rv:** -3.42  $\mu\text{m}$     **Sv:** 65.27  $\text{nm}^3/\text{nm}^2$   
**Rku:** 7.07    **Sku:** 7.15  
**Rsk:** 0.59    **Ssk:** 0.61

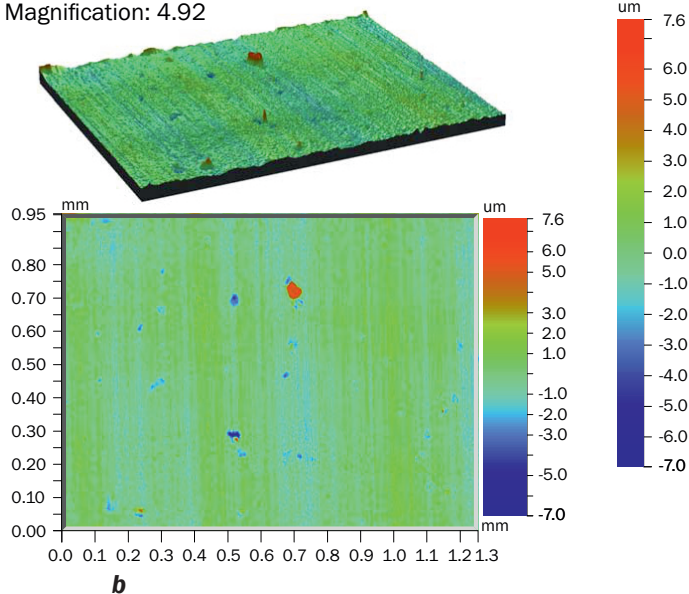
Magnification: 4.92



**Surface Stats:**

**Ra:** 500.83 nm    **Sa:** 500.77 nm  
**Rq:** 667.03 nm    **Sq:** 666.98 nm  
**Rz:** 11.13  $\mu\text{m}$     **Sz:** 7.65  $\mu\text{m}$   
**Rt:** 14.59  $\mu\text{m}$   
**Rp:** 7.63  $\mu\text{m}$   
**Rv:** -6.97  $\mu\text{m}$     **Sv:** 71.24  $\text{nm}^3/\text{nm}^2$   
**Rku:** 9.91    **Sku:** 9.92  
**Rsk:** 0.34    **Ssk:** 0.35

Magnification: 4.92



**Рис. 1.** Параметры поверхностного слоя образцов сплавов 92 (а) и 94 (b) с наименьшими значениями шероховатости поверхности по параметру  $Ra$

**Fig. 1.** Surface layer parameters of alloy samples 92 (a) and 94 (b) with the lowest values of surface roughness according to the  $Ra$  parameter

мальным и минимальным значением отношения SN в столбце. Значения  $\Delta$ , приведенные в табл. 6 и 7, показывают, что наиболее значимым фактором, влияющим на качество обработанной поверхности при точении

сплавов 92 и 94, является скорость резания  $V_c$ , вторым по значимости фактором является подача  $f$ .

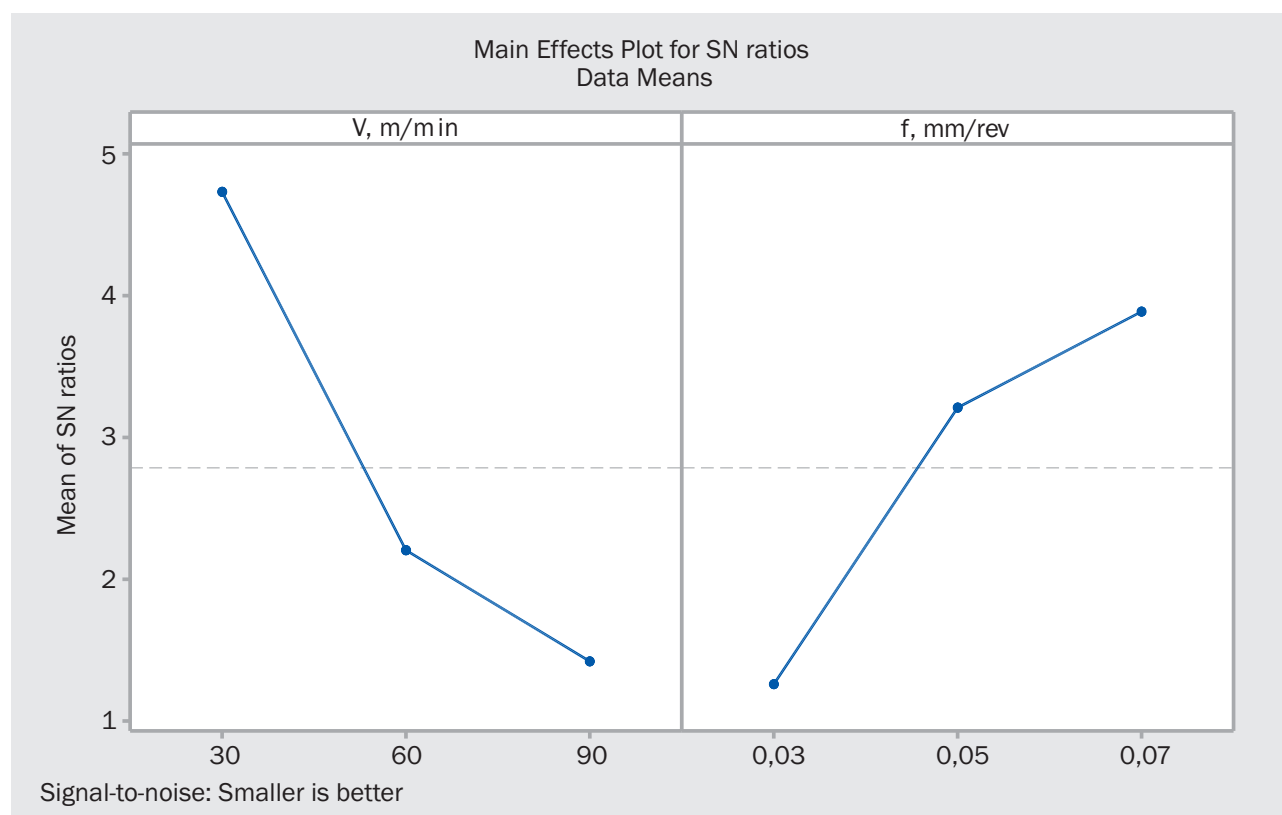
На рис. 2 и 3 представлены графики изменения отношения сигнал/шум SN

**Таблица 6.** Ранжирование параметров эксперимента для сплава 92  
**Table 6.** Ranking of experimental parameters for alloy 92

Уровень	Параметры эксперимента	
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об
1	<b>4,732</b>	1,259
2	2,204	3,210
3	1,420	<b>3,887</b>
$\Delta$	3,312	2,628
Ранг	1	2

**Таблица 7.** Ранжирование параметров эксперимента для сплава 94  
**Table 7.** Ranking of experimental parameters for alloy 94

Уровень	Параметры эксперимента	
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об
1	0,6514	1,3670
2	<b>4,0789</b>	1,3026
3	0,6025	<b>2,6631</b>
$\Delta$	3,4763	1,3605
Ранг	1	2



**Рис. 2.** Оценка влияния параметров процесса на выходную характеристику  $R_a$  путем анализа отношения сигнал/шум SN для сплава 92

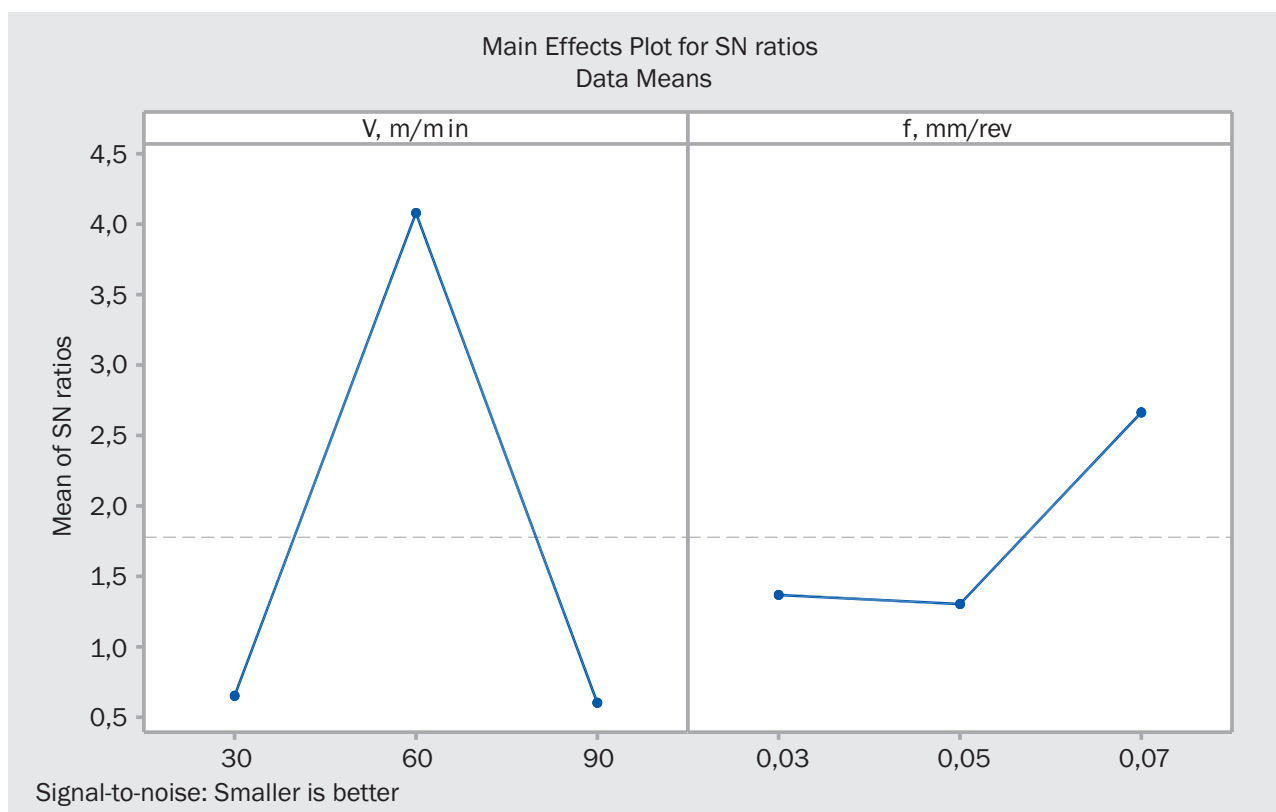
**Fig. 2.** Evaluation of the process parameter influence on the output characteristic  $R_a$  by analyzing the signal-to-noise ratio SN for alloy 92

для каждого из параметров точения, построенные в программном комплексе MiniTab на основе данных табл. 6 и 7. Оптимальное сочетание технологических параметров процесса можно определить, выбрав для каждого параметра номер уровня, имеющий максимальное значение отношения сигнал/шум. Из данных табл. 6 и 7 и графиков, представленных на рис. 2 и 3, находим оптимальное сочетание параметров  $V_c$  (2),  $f$  (3) по критерию минимизации шероховатости поверхности. Для сплава 92 оптимальным будет являться сочетание скорости резания  $V_c = 30$  мм/мин и подачи  $f = 0,07$  мм/об, для сплава 94 –  $V_c = 60$  мм/мин и  $f = 0,07$  мм/об.

Для образцов с наименьшим значением шероховатости поверхности были определены значения микротвердости поверхностного слоя (табл. 8).

Из данных табл. 8 видим, что наибольшее значение микротвердости поверхностного слоя после точения имеет сплав 92. Микротвердость сплава 92 увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением (280 HV).

После точения заготовки из сплава 92 на токарном продольном автомате Hanwha XP12S (Корея) с установленным режимом были изготовлены винты двух типоразмеров ( $d = 4,5$  мм  $l = 60$  мм;  $d = 4,5$  мм и  $l = 90$  мм) для остеointеграционного протезирования ампутированной конечности (рис. 4).



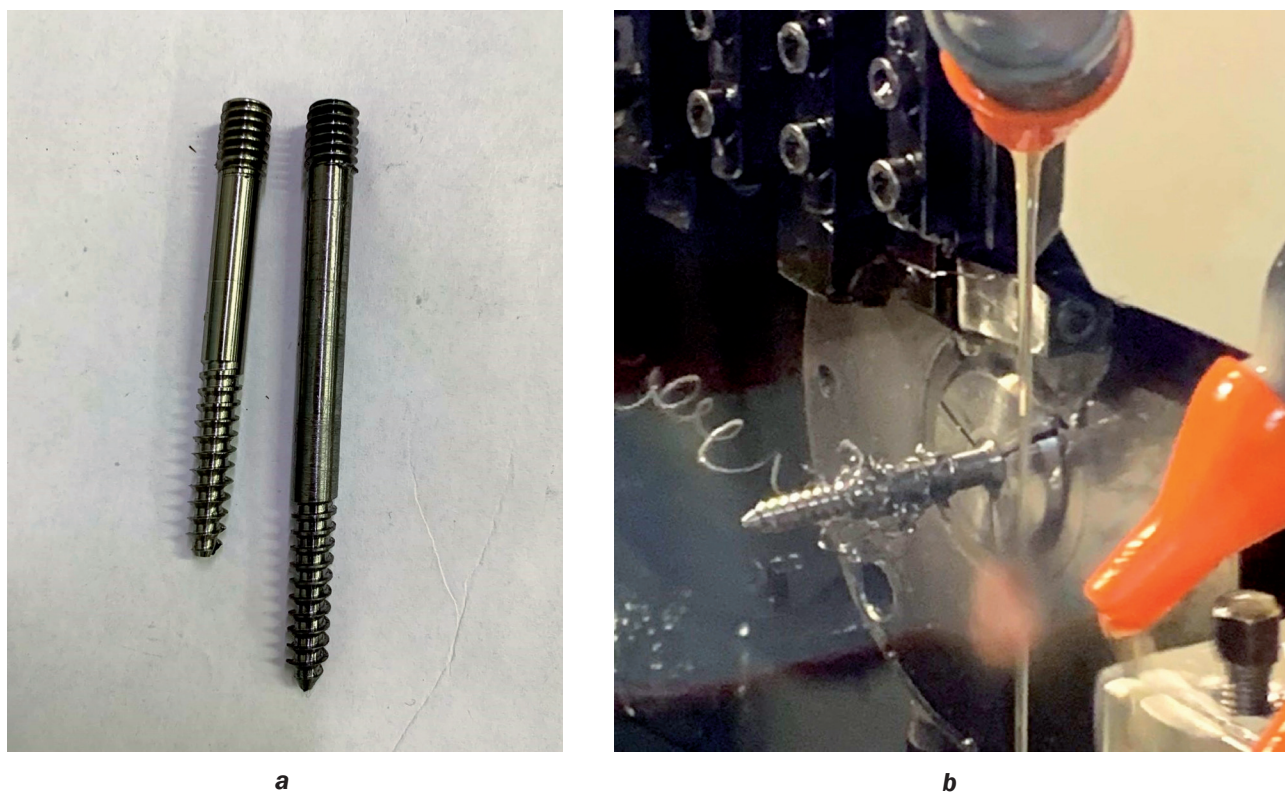
**Рис. 3.** Оценка влияния параметров процесса на выходную характеристику  $R_a$  путем анализа отношения сигнал/шум SN для сплава 94

**Fig. 3.** Evaluation of the process parameter influence on the output characteristic  $R_a$  by analyzing the signal-to-noise ratio SN for alloy 94

**Таблица 8.** Значения микротвердости  $HV_{0,05}$  поверхностного слоя образцов с наименьшими значениями шероховатости поверхности

**Table 8.** Values of surface layer microhardness  $HV_{0,05}$  of samples with the lowest surface roughness values

№ образца	Значение микротвердости $HV_{0,05}$			Среднее значение $HV_{0,05}$
	1	2	3	
92	322	323	318	321
94	261	247	248	252



**Рис. 4.** Обработка на станке (а) и внешний вид (б) готового имплантата для остеointеграционного протезирования

**Fig. 4.** Machine processing (a) and appearance (b) of the finished implant for osseointegration prosthetics

Для изготовления резьбы использовалась режущая пластина 3 VER 1.4 SAGEPARTIAL (Vargus, Израиль), применялся следующий режим резьбонарезания: скорость резания  $V_c = 30$  м/мин; подача  $f = 1,5$  мм/об;  $A_p = 0,05$  мм за проход.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено ранжирование параметров процесса обработки точением и определены оптимальные режимы точения титановых сплавов системы Ti-Nb-Zr по критерию минимизации шероховатости поверхности. Установлено, что максимальное влияние на шероховатость поверхности оказывает скорость резания  $V_c$ . Оптимальными сочетаниями значений режимов точения для достижения минимальной шероховатости поверхности являются: сплав 92 – скорость  $V_c = 30$  м/мин и подача  $f = 0,07$  мм/об; сплав 94 – скорость  $V_c = 60$  м/мин и подача  $f = 0,07$  мм/об.

Установлено, что присутствие в титановом сплаве (сплав 94) около 2% тантала (Ta) и олова (Sn) позволяет минимизировать шероховатость поверхности до значения  $Ra = 0,684$  мкм при более высокой скорости резания  $V_c = 60$  м/мин по сравнению со скоростью  $V_c = 30$  м/мин (сплав 92), тем самым повысив производительность обработки.

Для образцов титановых сплавов 92 и 94 определены значения микротвердости  $HV_{0,05}$  поверхностного слоя: для сплава 92 – среднее значение микротвердости  $HV_{0,05}$  составило 321 HV, для сплава 94 – 252 HV. Микротвердость сплава 92 увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением (280 HV).

Установленные оптимальные режимы точения для титановых сплавов 92 и 94 применены при изготовлении имплантов для остеointеграционного протезирования.

#### Список источников

1. Chen Yu., Han Pingping, Dehghan-Manshadi A., Kent D., Ehtemam-Haghighi Sh., Jowers C., et al. Sintering and biocompatibility of blended elemental Ti-xNb alloys // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020. Vol. 104. P. 103691. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103691>. EDN: KLEIQC.

2. Abdel-Hady G.M., Niinomi M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 20. P. 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>. EDN: RMMTLD.
3. Mishchenko O., Pogorielov M., Ovchynnykov O., Kapustian O. New Zr-Ti-Nb alloy for medical application: development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 6. P. 1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>. EDN: SSBOFU.
4. Zhang Yuqing, Sun Danni, Cheng Jun, Tsoi James Kit Hon, Chen Jiang. Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 Wt%)Nb alloys for biomedical implants application // *Regenerative Biomaterials*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 119–127. <https://doi.org/10.1093/rb/rbz042>. EDN: ZUUGDE.
5. Angelescu R.M., Raducanu D., Cojocar V.D., Angelescu M.L., Butu M., Cinca I., et al. Microstructural and mechanical evaluation of a Ti-Nb-Ta alloy // *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest*. 2015. Vol. 77. Iss. 3. P. 221–228.
6. Kim Kyong Min, Kim Hee Young, Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and young's modulus in Ti-Nb-Zr alloys // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 2. P. 476. <https://doi.org/10.3390/ma13020476>. EDN: XTDXUB.
7. Boubaker H.B., Le-Coz G., Moufki A., Nouari M., Laheurte P. Experimental and numerical investigations of cutting forces and chip formation during precision cutting of Ti42Nb titanium alloy produced by laser-based powder bed fusion // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. Iss. 2. P. 701–717. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11511-0>. EDN: XMLOY.
8. Maurotto A., Roy A., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Analysis of machinability of Ti- and Ni-based alloys // *Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 188. P. 330–338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.188.330>. EDN: PQFLAR.
9. Takahashi M., Kikuchi M., Takada Yu. Grindability of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 861. <https://doi.org/10.3390/met12050861>. EDN: DAPFER.
10. Jiang Shengxian, Sakurai J., Aono Y., Hata S. Novel evaluation method for machinability of Ni-Nb-Ti alloy // *The Proceedings of the Materials and Processing Conference*. 2013. Vol. 21. P. 632-1–632-1. [https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21\\_632-1](https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21_632-1).
11. Sakthivelu S., Anandaraj T. Prediction of optimum machining parameters on surface roughness and MRR in CNC drilling of AA6063 alloy using design of experiments // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2017. Vol. 5. Iss. 13. P. 1–5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS13078>.
12. Krishnaprakash, Pavitra A. Optimization of drilling parameters on surface roughness of Al 1200-SiC composites using Taguchi analysis // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2018. Vol. 15. Iss. 3. P. 77–84. <https://doi.org/10.9790/1684-1503047784>.
13. Suthar J., Teli S.N., Murumkar A. Drilling process improvement by Taguchi method // *Materialstoday: Proceedings*. 2021. Vol. 47. Part 11. P. 2814–2819. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.533>.
14. Kuznetsov V.P., Dmitriev A.I., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring burnishing technological parameters by Taguchi method // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016. Vol. 124. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/124/1/012022>.
15. Кузнецов В.П., Анисимова Г.С., Семенова Ю.В. Оптимизация методом Тагучи параметров наноструктурирующего выглаживания стали 20X13 по критерию упрочнения поверхностного слоя // *Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения) (г. Тольятти, 27–29 мая 2015 г.)*. Тольятти: ТГУ, 2015. Т. 1. С. 279–286. EDN: TZDFOD.
16. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Vorontsov I.A., Skorobogatov A.S., Kosareva A.V. Surface hardening of medical parts made of AISI 304 austenitic stainless steel by nanostructuring burnishing // *Physical Mesomechanics of Condensed Matter: Physical Principles of Multiscale Structure formation and the Mechanisms of Nonlinear behavior: AIP Conference Proceedings (Tomsk, 5–8 September 2022)*. Tomsk: AIP Conference Proceedings, 2023. Vol. 2899. Iss. 1. P. 020085. <https://doi.org/10.1063/5.0162889>. EDN: SZVLIH.
17. Patel R., Patel S., Patel P., Parmar P., Vohra J. Optimization of machining parameters for EN8D carbon steel by Taguchi's orthogonal array experiments in CNC turning // *Materialstoday: Proceedings*. 2021. Vol. 44. Part 1. P. 2325–2329. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.409>.
18. Lin Yue-Feng, Lai Pei-Yu, Chen Guan-Yu, Zhang Zi-Peng. Optimization of surface roughness and cylindricity using the Taguchi method in boring of S45C steel with tungsten steel and phosphor bronze damping materials // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 135. P. 5999–6015. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14796-x>.
19. Eroshenko A.Yu., Legostaeva E.V., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I., Khimich M.A. Kuznetsov V.P., et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Zr-Ta-Sn alloys in severe plastic deformation // *Materials Letters*. 2025. Vol. 382. P. 137805. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137805>.
20. Пат. № 2848396, Российская Федерация. С 1, А61L 27/06, А61В 17/86. Способ изготовления компрессионного винта для остеосинтеза костей стопы / В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц, А.С. Судницын, Ю.П. Шаркеев, А.И. Толмачев, А.Ю. Ерошенко, А.В. Корелин, Д.С. Гончаров; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. № 2024131299. Заявл. 18.10.2024; опубл. 17.10.2025. EDN: PSOUUV.

## References

1. Chen Yu., Han Pingping, Dehghan-Manshadi A., Kent D., Ehtemam-Haghighi Sh., Jowers C., et al. Sintering and biocompatibility of blended elemental Ti-xNb alloys. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;104:103691. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103691>. EDN: KLEIQC.
2. Abdel-Hady G.M., Niinomi M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;20:407-415. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>. EDN: RMMTLD.
3. Mishchenko O., Pogorielov M., Ovchynnykov O., Kapustian O. New Zr-Ti-Nb alloy for medical application: development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility. *Materials*. 2020;13(6):1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>. EDN: SSBOFU.
4. Zhang Yuqing, Sun Danni, Cheng Jun, Tsoi James Kit Hon, Chen Jiang. Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 Wt%)Nb alloys for biomedical implants application. *Regenerative Biomaterials*. 2019;7(1):119-127. <https://doi.org/10.1093/rb/rbz042>. EDN: ZUUGDE.
5. Angelescu R.M., Raducanu D., Cojocaru V.D., Angelescu M.L., Butu M., Cinca I., et al. Microstructural and mechanical evaluation of a Ti-Nb-Ta alloy. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest*. 2015;77(3):221-228.
6. Kim Kyong Min, Kim Hee Young, Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and young's modulus in Ti-Nb-Zr alloys. *Materials*. 2020;13(2):476. <https://doi.org/10.3390/ma13020476>. EDN: XTDXUB.
7. Boubaker H.B., Le-Coz G., Moufki A., Nouari M., Laheurte P. Experimental and numerical investigations of cutting forces and chip formation during precision cutting of Ti42Nb titanium alloy produced by laser-based powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;131(2):701-717. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11511-0>. EDN: XMLOY.
8. Maurotto A., Roy A., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Analysis of machinability of Ti- and Ni-based alloys. *Solid State Phenomena*. 2012;188:330-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.188.330>. EDN: PQFLAR.
9. Takahashi M., Kikuchi M., Takada Yu. Grindability of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications. *Metals*. 2022;12(5):861. <https://doi.org/10.3390/met12050861>. EDN: DAPFER.
10. Jiang Shengxian, Sakurai J., Aono Y., Hata S. Novel evaluation method for machinability of Ni-Nb-Ti alloy. *The Proceedings of the Materials and Processing Conference*. 2013;21:632-1-632-1. [https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21.\\_632-1\\_](https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21._632-1_).
11. Sakthivelu S., Anandaraj T. Prediction of optimum machining parameters on surface roughness and MRR in CNC drilling of AA6063 alloy using design of experiments. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2017;5(13):1-5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS13078>.
12. Krishnaprakasha, Pavitra A. Optimization of drilling parameters on surface roughness of Al 1200-SiC composites using Taguchi analysis. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2018;15(3):77-84. <https://doi.org/10.9790/1684-1503047784>.
13. Suthar J., Teli S.N., Murumkar A. Drilling process improvement by Taguchi method. *Materialstoday: Proceedings*. 2021;47(11):2814-2819. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.533>.
14. Kuznetsov V.P., Dmitriev A.I., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring burnishing technological parameters by Taguchi method. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;124:012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/124/1/012022>.
15. Kuznetsov V.P., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring smoothing parameters of 20Kh13 steel by the Taguchi method according to the surface layer hardening criterion. In: *Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekty povysheniya effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva: trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Reznikovskie chteniya) = Thermophysical and technological aspects of increasing efficiency of mechanical engineering production: Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference (Reznikov Readings)*. 27-29 May 2015, Tolyatti: Tolyatti State University; 2015, p. 279-286. (In Russ.). EDN: TZDFOD.
16. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Vorontsov I.A., Skorobogatov A.S., Kosareva A.V. Surface hardening of medical parts made of AISI 304 austenitic stainless steel by nanostructuring burnishing. In: *Physical Mesomechanics of Condensed Matter: Physical Principles of Multiscale Structure formation and the Mechanisms of Nonlinear behavior: AIP Conference Proceedings*. 5-8 September 2022, Tomsk. Tomsk: AIP Conference Proceedings; 2023, vol. 2899, Iss. 1, p. 020085. <https://doi.org/10.1063/5.0162889>. EDN: SZVLIH.
17. Patel R., Patel S., Patel P., Parmar P., Vohra J. Optimization of machining parameters for EN8D carbon steel by Taguchi's orthogonal array experiments in CNC turning. *Materialstoday: Proceedings*. 2021;44(1):2325-2329. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.409>.
18. Lin Yue-Feng, Lai Pei-Yu, Chen Guan-Yu, Zhang Zi-Peng. Optimization of surface roughness and cylindricity using the Taguchi method in boring of S45C steel with tungsten steel and phosphor bronze damping materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:5999-6015. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14796-x>.
19. Eroshenko A.Yu., Legostaeva E.V., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I., Khimich M.A. Kuznetsov V.P., et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Zr-Ta-Sn alloys in severe plastic deformation. *Materials Letters*. 2025;382:137805. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137805>.
20. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Sudnitsyn A.S., Sharkeev Yu.P., Tolmachev A.I., Eroshenko A.Yu., Korelin A.V., Goncharov D.S. *Method of manufacturing a compression screw for osteosynthesis of foot bones*. Patent RF, no. 2848396; 2024. (In Russ.). EDN: PSOUUV.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Виктор Павлович Кузнецов,**

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры термообработки  
и физики металлов,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;  
заведующий лабораторией научных исследований  
биомеханики и инжиниринга,  
Национальный медицинский исследовательский  
центр травматологии и ортопедии имени  
академика Г.А. Илизарова,  
640041, г. Курган, ул. Марии Ульяновой, 6, Россия  
✉ wpkuzn@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>

**Дмитрий Сергеевич Гончаров,**

аспирант,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
[goncharovv.d@yandex.ru](mailto:goncharovv.d@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-9603-5980>

**Олег Геннадьевич Блинков,**

д.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой «Технологии  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
[o.g.blinkov@urfu.ru](mailto:o.g.blinkov@urfu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7353-9582>

**Юрий Петрович Шаркеев,**

д.ф.-м.н., профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории  
физики наноструктурных биоконпозитов,  
Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН,  
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, Россия  
[sharkeev@ispms.ru](mailto:sharkeev@ispms.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>

## Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 28.08.2025 г.; принята к публикации 10.09.2025 г.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktor P. Kuznetsov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Heat Treatment  
and Physics of Metals,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
Head of the Laboratory of Scientific Research  
in Biomechanics and Engineering,  
National Ilizarov Medical Research  
Centre for Traumatology and Ortopaedics,  
6 Maria Ulyanova St., Kurgan 640041, Russia  
✉ wpkuzn@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>

**Dmitrii S. Goncharov,**

Postgraduate Student,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
[goncharovv.d@yandex.ru](mailto:goncharovv.d@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-9603-5980>

**Oleg G. Blinkov,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanical  
Engineering Technologies, Machine Tools and Instruments,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
[o.g.blinkov@urfu.ru](mailto:o.g.blinkov@urfu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7353-9582>

**Yurii P. Sharkeev,**

Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor,  
Chief Researcher of the Laboratory  
of Physics of Nanostructured Biocomposites,  
Institute of Strength Physics and Materials Science,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
2/4 Akademicheskii pr., Tomsk 634055, Russia  
[sharkeev@ispms.ru](mailto:sharkeev@ispms.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>

## Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

## Information about the article

The article was submitted 21.07.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.