

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕЗЬБОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРАСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ

А. С. Пятых¹, С. А. Тимофеев², В. А. Ушаков¹

*Кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств» (1),
ruatykhas@ex.istu.edu, НИЛ «Технологии высокопроизводительной механической
обработки» (2), ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
университет», Иркутск, Россия*

Ключевые слова: режимы резания; резьба; титановые сплавы; точение; транспедикулярный винт; шероховатость поверхности винта.

Аннотация: Изучено влияние параметров механической обработки на качество резьбовой поверхности транспедикулярных винтов. В качестве материала заготовки использованы титановый сплав ВТ6, головка для вихревого резбонарезания со сменными твердосплавными пластинами. Обработка выполнена на токарном станке продольного точения. В процессе изготовления транспедикулярных винтов дана оценка влияния угла наклона резбонарезной головки на шероховатость поверхности винта. Контроль шероховатости осуществлен с помощью оптического профилометра. В качестве контролируемого параметра рассмотрен параметр шероховатости *Ra*. Изучена микроструктура транспедикулярных винтов на световом металлографическом микроскопе в светлом поле при увеличении от 100 до 1000 раз. В результате экспериментов определен рациональный угол наклона резбонарезной головки с точки зрения влияния на шероховатость поверхности транспедикулярного винта.

Введение

Распространенность заболеваний и нарушений позвоночника значительно возросла, и ожидается, что данная тенденция сохранится и в ближайшие десять лет. В связи с этим возрастают и количественные объемы применяемых спинальных устройств для лечения остеохондроза, сложных деформаций, а также лечения травм и переломов. Спинальные устройства по мере их применения становятся все более актуальными. Проблема поломки транспедикулярных винтов, существующая в РФ, приводит к дополнительной травматизации (вплоть до риска летального исхода), ухудшению качества жизни и снижению трудоспособности пациентов, которым они были установлены, а также вызывает увеличение нагрузки на системы здравоохранения и социального обеспечения [1]. Актуальной становится задача обеспечения качества изготовления спинальных устройств, в том числе и транспедикулярных имплантов для проведения минимально инвазивных процедур, исключающих впоследствии риски реимплантации.

Поломки транспедикулярных винтов наблюдаются в месте перехода от головки винта к резьбовой части и(или) в месте третьего-четвертого резьбового витка. Данные участки – наиболее нагруженные, поэтому дефекты поверхности винта могут являться концентраторами и играть роль очагов возникновения суб-

микроскопических нарушений сплошности металла поверхностного слоя, становясь первопричиной образования усталостных трещин. Концентрация напряжений, возникающая во впадинах микронеровностей, зависит от высоты, радиуса закругления впадин и шага микронеровностей [2]. В связи с этим становится актуальной задача минимизации концентраторов напряжений за счет обеспечения минимальной шероховатости поверхностей винта [3].

В научной литературе вопросы обеспечения качества транспедикулярных винтов за счет выбора оптимальной технологии изготовления и назначения обоснованных режимов резания рассматриваются в ограниченном количестве публикаций. В большинстве работ авторы уделяют внимание формированию поверхности за счет химического травления или пескоструйной обработки [4, 5]. При этом прочностные характеристики винтов зависят от качества поверхности, получаемой после нарезания резьбы. Следовательно, перед суперфинишной операцией, которой является пескоструйная обработка, требуется обеспечить шероховатость наружных поверхностей винта Ra не более 0,63 мкм.

Существуют лезвийная и аддитивная технологии изготовления транспедикулярных винтов. К лезвийной технологии относится так называемое одноточечное резбонарезание, когда резьба формируется с помощью классического резбового резца со сменной пластиной, и многоточечное, когда формирование резьбы осуществляется вихревой головкой с несколькими сменными пластинами, в результате чего повышается производительность и точность изготовления. Данная технология позволяет избежать разупрочнения поверхности, характерного для титановых сплавов [6 – 8], вследствие воздействия высоких температур и обеспечивает лучшее напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Винты, изготавливаемые по аддитивной технологии, не соответствуют предъявляемым прочностным характеристикам. Они показали меньшее сопротивление испытаниям на вырыв, чем винты, изготовленные механической обработкой. Однако такие винты за счет менее острой геометрии резьбы обеспечивают лучшее распределение нагрузок и уменьшают эффект надреза [9].

Таким образом, наиболее эффективной технологией изготовления резьбовой части транспедикулярных винтов является вихревое резбонарезание.

Материалы и методы

Для изготовления транспедикулярного винта использована заготовка, которая представляет собой прутки $\varnothing 12$ мм из титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки. Химический состав данного сплава, %: Fe – 0...0,3; C – 0...0,1; Si – 0...0,1; V – 3,5...5,3; N – 0...0,05; Ti – 86,45...90,9; Al – 5,3...6,8; Zr – 0...0,3; O – 0...0,2; H – 0...0,015. Механические свойства титанового сплава ВТ6: относительное сужение образца $\psi = 20 - 45$ %; относительное удлинение после разрыва $\delta_5 = 8 - 20$ %; предел прочности при растяжении $\sigma_B = 900...1100$ МПа; твердость $HB \cdot 10^{-1} = 293...361$ МПа.

Экспериментальное изготовление транспедикулярных винтов выполнялось на токарном автомате продольного точения Cincom K16E-VII (рис. 1). Обработка резьбовой части винта выполнялась головкой для вихревого резбонарезания UTILIS MWT12 164 4057 105 09 QC с пластинами MWI12 164 HB6.5 VPUNM10TX+. Изображение головки представлено на рис. 2. Режимы резания определены на основании рекомендаций производителя инструмента. Угол резбобфрезерования подбирался опытным путем (табл. 1). Установка угла фрезерования резьбы осуществлялась с помощью цифрового инклинометра (рис. 3).

В результате изготовлено четыре транспедикулярных винта согласно режимам, указанным в табл. 1. Качество поверхности винтов контролировалось с помощью оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 (рис. 4), результаты 3D-сканирования представлены на рис. 5 и в табл. 2. Требование шероховатости наружных поверхностей винтов Ra не более 2,5 мкм по ГОСТ 2789–73 [10], ГОСТ Р 50582–93 [11].

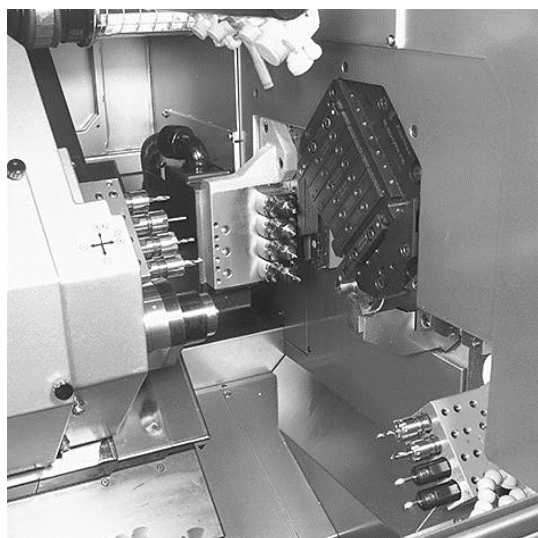


Рис. 1. Рабочая зона станка продольного точения Sincom K16E-VII



Рис. 2. Головка для вихревого нарезания резьбы

Таблица 1

Базовые режимы резания для резьбонарезной головы

Скорость резания V_c , м/мин	Подача f_z , мм/зуб	Глубина резания a_p , мм	Угол фрезерования δ , °
120	0,02	2,25	5,5
			10,0
			10,6
			12,15

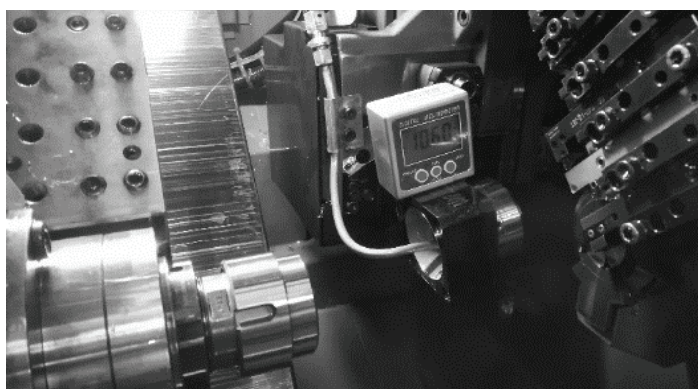


Рис. 3. Установка угла фрезерования

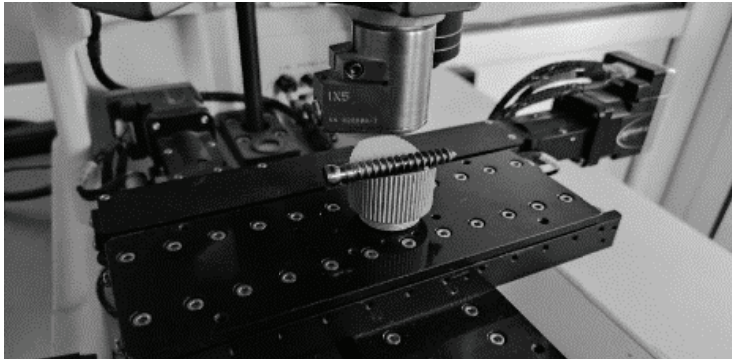


Рис. 4. Измерение шероховатости поверхности транспердикулярного винта на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1

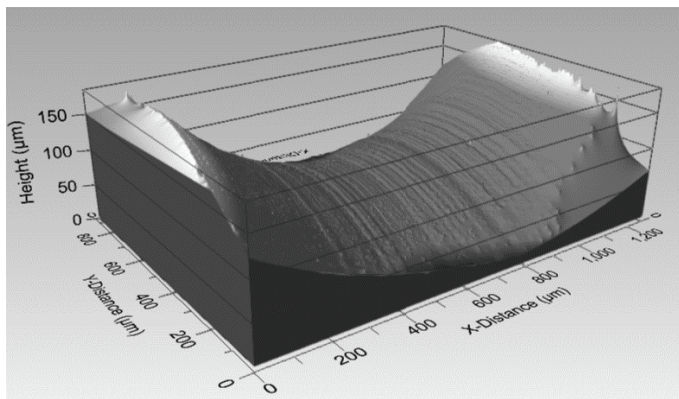


Рис. 5. Поверхность образца винта, полученная в результате сканирования на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1

Таблица 2

Результаты измерения шероховатости

Скорость резания V_c , м/мин	Подача f_z , мм/зуб	Глубина резания a_p , мм	Угол фрезерования δ , °	Ra , мкм
120	0,02	2,25	5,5	0,5686
			10,0	0,5541
			10,6	0,4109
			12,15	0,4994

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что шероховатость резьбовой поверхности винта зависит от угла резьбофрезерования. Наименьшее значение параметра шероховатости Ra достигается при резьбофрезеровании с установленным инструментом под углом $10,6^\circ$.

Далее опытные образцы винтов были разрезаны на части в целях последующего изготовления образцов для микроанализа (рис. 6). После чего исследована микроструктура материала опытных образцов винта на световом микроскопе металлографическом МЕТ-3 в светлом поле при увеличении от 100 до 1000 раз.

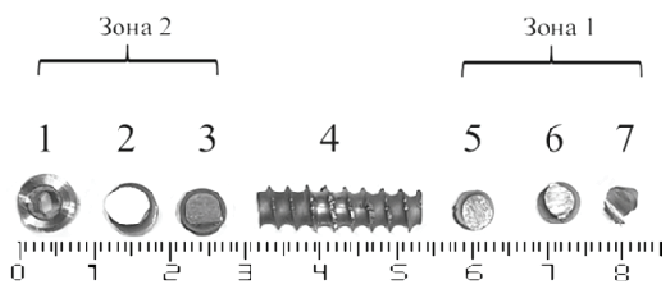


Рис. 6. Схема разрезки опытного транспедикулярного винта

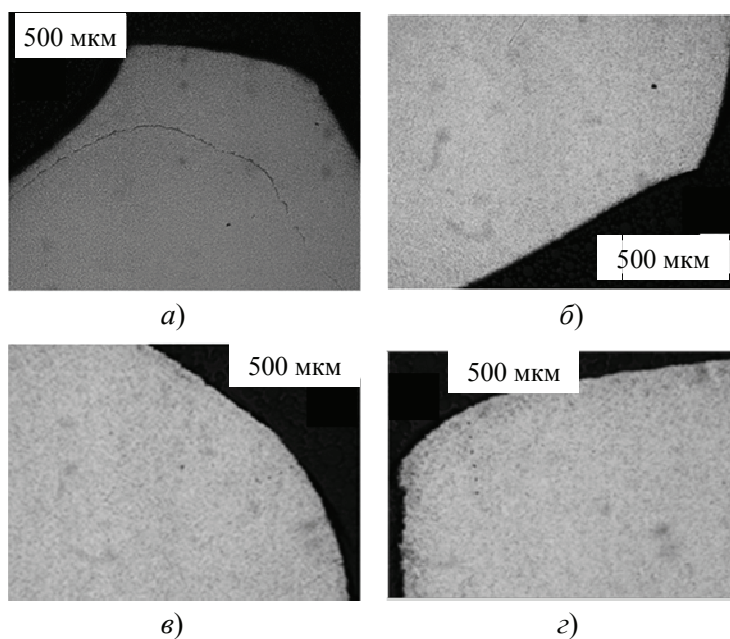


Рис. 7. Микроструктура винтов, изготовленных с углом фрезерования:
 $a - 5,5^\circ$; $b - 10^\circ$; $в - 10,6^\circ$; $г - 12,15^\circ$

Изображения микроструктуры винтов, изготовленных при резбифрезеровании под углом инструмента $5,5^\circ$ и 10° , представлены на рис. 7.

Неравномерное травление материала обнаружено в образце винта, изготовленного инструментом, установленным под углом $5,5^\circ$ (см. рис. 7, *a*). На изображении видно отслоение материала по прерывистой линии, которая повторяет контур резьбы, что является недопустимым. В остальных образцах структура однородная без видимых следов отслоения. Таким образом, лучшие результаты получены при изготовлении транспедикулярного винта инструментом с углом фрезерования $10,6^\circ$ (см. рис. 7, *в*).

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование влияния угла резбифрезерования на качество винтовой поверхности транспедикулярного винта. Установлено, что угол резбифрезерования оказывает непосредственное влияние на шероховатость получаемой поверхности. На установленных параметрах рез-

бофрезерования удалось достичь минимальных значений шероховатости поверхности $Ra = 0,4109$ мкм.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при выборе оптимального угла резьбофрезерования, обеспечивающего требуемое качество поверхности при изготовлении транспедикулярных винтов.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований в целях построения математической модели зависимости шероховатости Ra от режимов резания и угла резьбофрезерования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Повышение эффективности технологии изготовления медицинских имплантов из титановых сплавов», № МК-2982.2022.4.

Список литературы

1. Бердюгин, К. А. Осложнения транспедикулярной фиксации позвоночника и их профилактика / К. А. Бердюгин, М. С. Каренин // *Фундаментальные исследования*. – 2010. – № 9. – С. 61 – 71.
2. Мамонтов, В. А. Методика оценки долговечности коленчатого вала судового ДВС по реальному профилю микронеровностей его поверхностей / В. А. Мамонтов, О. Н. Синельщикова // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. – 2008. – № 5(46). – С. 50 – 54.
3. Hsu, C.-C. Comparison of Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network in Developing the Objective Functions of the Orthopaedic Screws / C.-C. Hsu, J. Lin, C.-K. Chao // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. – 2011. – Vol. 104, No. 3. – P. 341 – 348. doi: 10.1016/j.cmpb.2010.11.004
4. Kemény, A. Osseo Integration Specified Grit Blasting Parameters / A. Kemény, I. Hajdu, D. Károly, D. Pammer // *Proc. of the Materials Today*. – 2018. – Vol. 5, No. 13. – P. 26622 – 26627. doi: 10.1016/j.matpr.2018.08.126
5. Effect of Micrometer-Scale Roughness of the Surface of Ti_6Al_4V Pedicle Screws in Vitro and in Vivo / Z. Schwartz [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery*. – 2008. – Vol. 90A, No. 11. – P. 2485 – 2498. doi: 10.2106/JBJS.G.00499
6. Bulbule, M. Automated Production of Medical Screws Using Titanium Bar on Indigenous Sliding Headstock Automat / M. Bulbule, N. Hosamani, S. R. Chandramouli // *Proc. of AIMTDR, Advances in Forming, Machining and Automation*. – Springer, Singapore, 2018. – P. 709 – 722. doi:10.1007/978-981-32-9417-2_60
7. Серебренникова, А. Г. Обеспечение качества поверхности и производительности обработки при фрезеровании титановых сплавов BT20 и BT22 / А. Г. Серебренникова, А. В. Савилов // *Научно-технические в машиностроении*. – 2020. – № 6(108). – С. 33 – 36. doi: 10.30987/2223-4608-2020-6-33-36
8. Savilov, A. V. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning / A. V. Savilov, V. M. Svinin, S. A. Timofeev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015, No. 4. – P. 042055. doi: 10.1088/1742-6596/1015/4/042055
9. La Rosa, G. Experimental Analysis of Pedicle Screws / G. La Rosa, C. Clienti, R. Mineo, A. L. Audenino // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 2, No. 10. – P. 1244 – 1251. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.159
10. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 6 с.

11. ГОСТ Р 50582–93. Имплантаты для хирургии. Металлические костные шурупы со специальной резьбой, сферической головкой и внутренним шестигранным под ключ. Размеры. – Введ. 1995-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 10 с.

Investigation of the Quality of the Threaded Surface of Pedicle Screws

A. S. Pyatykh¹, S. A. Timofeev², V. A. Ushakov¹

Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries (1), pyatykhas@ex.istu.edu, Research Laboratory “Technologies of High-Performance Machining” (2), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Keywords: turning; pedicle screw; thread; roughness; titanium alloys; cutting parameters.

Abstract: The purpose of this paper is to study the parameters of surface treatment of pedicle screws. Titanium alloy VT6 and a whirl cutting head with replaceable carbide inserts were used as materials. Machining was performed on a longitudinal turning lathe. In the process of manufacturing pedicle screws, the influence of the angle of inclination of the thread-cutting head was evaluated for the roughness of the screw surface. The roughness was controlled using an optical profilometer. The roughness parameter *Ra* was used as the setting parameter. The microstructure of the pedicle rifles was used on a light metallographic microscope in a bright field when collected from 100 to 1000 times. As a result of the experiments, a certain angle of inclination of the threading head was determined in terms of studying the surface roughness of the pedicle screw.

References

1. Berdyugin K.A., Karenin M.S. [Complications of transpedicular fixation of the spine and their prevention], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2010, no. 9, pp. 61-71. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Mamontov V.A., Sinel'shchikova O.N. [A method for assessing the durability of the crankshaft of a marine internal combustion engine based on the real profile of microroughness of its surfaces], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University], 2008, no. 5(46), pp. 50-54. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Hsu C.-C., Lin J., Chao C.-K. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network in developing the objective functions of the orthopaedic screws. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2011, vol. 104, no. 3, pp. 341-348. doi: 10.1016/j.cmpb.2010.11.004
4. Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters, *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 13, pp. 26622-26627. doi: 10.1016/j.matpr.2018.08.126
5. Schwartz Z., Raz P., Zhao G., Barak Y., Tauber M., Yao H., Boyan B.D. Effect of Micrometer-Scale Roughness of the Surface of Ti₆Al₄V Pedicle Screws in Vitro and in Vivo, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 2008, vol. 90A, no. 11, pp. 2485-2498. doi: 10.2106/JBJS.G.00499

6. Bulbule M., Hosamani N., Chandramouli S.R. Automated production of medical screws using titanium bar on indigenous sliding headstock automat, In book: *Advances in Forming, Machining and Automation, Proceedings of AIMTDR*, 2018, pp.709-722. doi:10.1007/978-981-32-9417-2_60

7. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. [Assurance of surface quality and productivity of machining at milling titanium alloys VT20 and VT22], *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering], 2020, no. 6(108), pp.33-36. doi: 10.30987/2223-4608-2020-6-33-36 (In Russ., abstract in Eng.).

8. Savilov A.V., Svinin V.M. Timofeev S.A. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 4, p. 042055, doi: 10.1088/1742-6596/1015/4/042055

9. Rosa G. La, Clienti C., Mineo R., Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws, *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, no. 10, pp. 1244-1251. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.159

10. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [Surface roughness. Parameters and characteristics], Moscow: Standartinform, 2018, 6 p. (In Russ.).

11. GOST R 50582-93. *Implantaty dlya khirurgii. Metallicheskiye kostnyye shurupy so spetsial'noy rez'boy, sfericheskoy golovkoy i vnutrennim shestigrannikom pod klyuch. Razmery* [Implants for surgery. Metal bone screws with special thread, spherical head and turnkey internal hexagon. Dimensions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1993, 10 p. (In Russ.).

Untersuchung der Qualität der Gewindefläche von Pedikelschrauben

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss von Bearbeitungsparametern auf die Qualität der Gewindeoberfläche von Pedikelschrauben untersucht. Als Werkstückmaterial kam die Titanlegierung VT6 zum Einsatz, ein Kopf zum Wirbelgewindeschneiden mit auswechselbaren Hartmetalleinsätzen. Die Bearbeitung erfolgte auf einer Längsdrehbank. Bei der Herstellung transpedikulärer Schrauben ist der Einfluss des Neigungswinkels des Gewindeschneidkopfes auf die Rauheit der Schraubenoberfläche bewertet. Die Rauigkeit ist unter Verwendung des optischen Profilometers kontrolliert. Als kontrollierter Parameter ist der Rauheitsparameter Ra betrachtet. Die Mikrostruktur von Pedikelschrauben ist auf einem leichten metallographischen Mikroskop im Hellfeld bei 100- bis 1000-facher Vergrößerung untersucht. Als Ergebnis der Versuche ist ein rationaler Neigungswinkel des Gewindeschneidkopfes im Hinblick auf die Auswirkung auf die Oberflächenrauigkeit der Pedikelschraube ermittelt.

Étude de la qualité de la surface fileté des vis transpédiculaires

Résumé: Est étudiée l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité de la surface fileté des vis transpédiculaires. En qualité de matériau de la pièce sont utilisés l'alliage de titane WT6, la tête de filetage vortex avec des plaquettes en carbure remplaçables. L'usinage est effectué sur un tour de tournage longitudinal. Dans le processus de la fabrication des vis transpédiculaires, est évaluée l'influence de l'angle

d'inclinaison de la tête de filetage sur la rugosité de la surface de la vis. Le contrôle de la rugosité est effectué à l'aide d'un profilomètre optique. Le paramètre de rugosité Ra est considéré comme un paramètre contrôlé. Est étudiée la microstructure des vis transpédiculaires sur un microscope métallographique à lumière dans un champ lumineux à un grossissement de 100 à 1000 fois. À la suite des expériences, est déterminé l'angle d'inclinaison rationnel de la tête de filetage en termes d'influence sur la rugosité de la surface de la vis transpédiculaire.

Авторы: *Пятых Алексей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств»; *Тимофеев Сергей Анатольевич* – младший научный сотрудник, НИЛ «Технологии высокопроизводительной механической обработки»; *Ушаков Владислав Александрович* – студент; ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия.
