



Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов

© А.В. Савилов, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – повышение эффективности процессов механической обработки транспедикулярных винтов из титановых сплавов на высокопроизводительном оборудовании на основе выбора прогрессивных технологических подходов, анализ современной технологии изготовления имплантов на станках с программным управлением типа токарный полуавтомат продольного точения. В качестве критериев оценки эффективности использовались производительность процесса, определяемая машинным временем, и качество обработки имплантов (шероховатость поверхности, геометрическая точность, механические свойства). Установлено, что токарные полуавтоматы продольного точения, оснащенные цанговой системой подачи прутка и приводными головками для вихревого нарезания резьбы, позволяют обрабатывать импланты типа транспедикулярного винта за один установ с максимальной эффективностью. Показано, что технология механообработки транспедикулярных винтов в значительной мере определяется особенностями их конструкции. Тип и форма резьбы оказывают наибольшее влияние на применяемый режущий инструмент и режимы резания. Анализ поломок винтов выявил, что основными причинами являются конструктивные дефекты и низкое качество обработки резьбовой части. Установлено, что применение метода вихревого нарезания резьбы позволяет получить резьбу за один проход и значительно повысить производительность обработки по сравнению с традиционной технологией без потери качества. Дополнительными преимуществами данного метода являются сокращение количества используемых инструментов и дополнительных финишных операций для удаления заусенцев. На основании проведенного анализа рекомендовано при изготовлении транспедикулярных винтов из титановых сплавов применять прогрессивные режущие инструменты – фрезы для вихревого резьбонарезания, обеспечивающие увеличение производительности процесса обработки в 4 раза без потери качества обрабатываемого изделия; снизить шероховатость поверхности до 2 раз, при этом уменьшится температура в зоне резания, что будет положительно влиять на ресурс обработанных изделий. Для эффективного применения указанных фрез необходимо оснащать используемые в технологическом процессе станки специальными приводными головками.

Ключевые слова: транспедикулярный винт, титановый сплав, режущий инструмент, многооперационные станки, вихревое резьбонарезание

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям России в рамках договора №3440ГС1/57422 от 18.02.2020 (код 0057422), заявка №С1-69876, конкурс Старт-19-1 (4 очередь).

Для цитирования: Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1190–1198. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>

Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies

Andrey V. Savilov, Aleksey S. Pyatykh, Sergey A. Timofeev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose is to improve the machining efficiency of titanium alloy transpedicular screws on high-performance machine-tools based on the selection of advanced technological approaches, and to analyze the current manufacturing technology of implants on CNC machines of the semi-automatic longitudinal turning lathe type. The efficiency is assessed using the following criteria: process performance determined by the machine time and the quality of implant processing (surface roughness, geometric accuracy, mechanical properties). It is found that semi-automatic longitudinal lathes equipped with a collet feed system and drive heads for thread whirling allow processing the implants of the transpedicular screw type in a single set-up with maximum efficiency. It is shown that the machining technology of transpedicular screws is largely determined by the features of their design. The type and shape of the thread have the greatest influence on the used cutting tool and cutting modes. The analysis of screw breakages revealed that the main failure reasons are design defects and poor machining quality of the threaded part. It is determined that the use of the thread whirling method makes it possible to obtain the thread in one cutting pass and, therefore, significantly increase the

machining performance compared to the traditional technology without any loss of quality. Additional advantages of this method are the reduction in the number of tools used and follow-on finishing deburring operations. Based on the conducted analysis the manufacture of transpedicular titanium alloy screws is recommended to perform using advanced cutting tools, primarily thread whirling cutters ensuring 4 times increase in machining performance without any loss of the processed item quality and 2 times reduced surface roughness. In this case the temperature in the cutting zone decreases, which has a positive effect on processed product service life. The condition for the effective use of the cutters is equipping of the machine-tools involved in the technological process with special drive heads.

Keywords: transpedicular screw, titanium alloy, cutting tools, multi-operational machines, thread whirling

Acknowledgements: The work is supported by the Russian Innovation Promotion Fund under the contract no. 3440ГC1/57422 of 18 February 2020 (code 0057422), application no. C1-69876, Start-19-1 competition (4th stage).

For citation: Savilov AV, Pyatykh AS, Timofeev SA. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1190–1198. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие высокотехнологичной медицины зависит от научных и технических достижений в разных областях знаний. Одной из таких областей является технология машиностроения и одно из ее направлений – механообработка. Ключевое влияние на успехи медицины механообработка оказывает в травматологии, ортопедии и других направлениях, связанных с хирургическим вмешательством в организм пациента с последующей установкой протезов, имплантов и других подобных медицинских изделий.

Объем рынка ортопедических имплантов увеличивается с каждым годом в связи с совершенствованием технологий проведения медицинских операций и реабилитации пациентов. Также спрос на данный товар определяется снижением возраста пациентов, прибегающих к оперативному вмешательству, вызванному преждевременной трансформацией костной ткани в связи с нарушением питания и малоподвижным образом жизни. Эти факторы в полной мере относятся к транспедикулярным винтам, применяемым при операциях на позвоночнике. Одним из наиболее распространенных материалов для изготовления транспедикулярных винтов является титан. Так как титан относится к труднообрабатываемым материалам, при разработке технологических процессов изготовления винтов разработчики сталкиваются с типовыми проблемами: низкая стойкость инструмента, высокая температура в зоне резания, возникновение вибраций [1]. Особенности конструкции транспедикулярных вин-

тов усложняют решение указанных проблем. При этом в открытой печати практически отсутствуют работы, посвященные исследованию процесса механообработки транспедикулярных винтов и влиянию технологии обработки и режимов резания на функциональные качества изделия и его ресурс.

КОНСТРУКТИВНЫЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Существует несколько конструкций транспедикулярных винтов. Основные конструкции представляют собой винты с боковой фиксацией стержня и совмещающие узел фиксации с вертикальной укладкой стержня. Последние могут быть как моноаксиальными, то есть с жесткой осью резьбы, так и полиаксиальными, то есть с изменяющимся углом расположения резьбовой части (рис. 1).

С точки зрения изготовления конструкция моноаксиального винта (рис. 2 а) является более простой, однако для придания винту угла в оси корня дуги требуется чрезмерное растяжение краев раны. Конструкция полиаксиального винта (рис. 2 б) изначально предусматривает придание угла и не требует чрезмерного растяжения краев раны. При этом технологический процесс изготовления такого типа винта является более трудозатратным.

Конструкция поперечного сечения винта обычно представляет собой однозаходную или двухзаходную треугольную резьбу. В узле фиксации винта применяется треугольная или упорная резьба. Наконечник винта, как правило, закругленный.

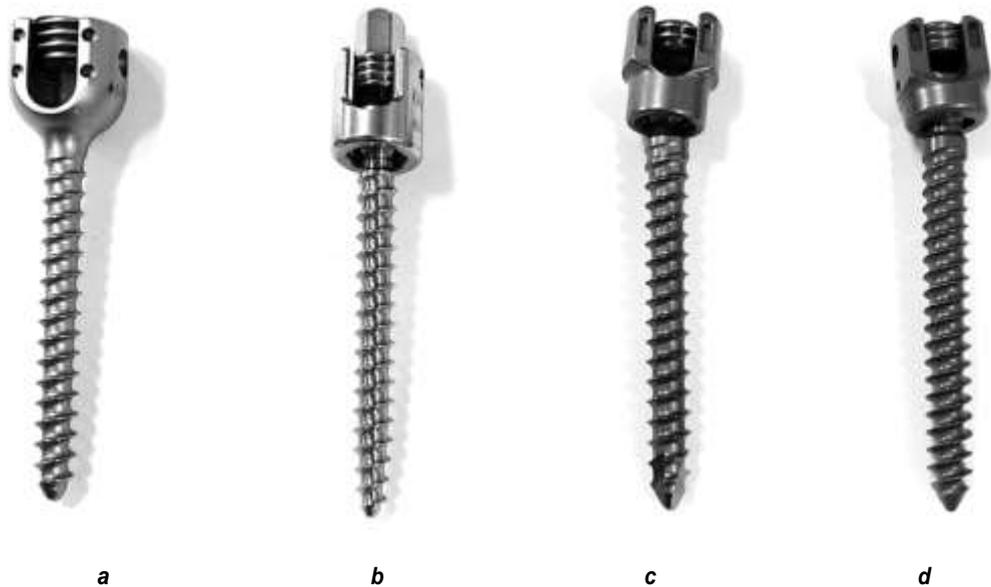


Рис. 1. Транспедикулярные винты: а – моноосиальный; б, с, d – полиосиальные
Fig. 1. Transpedicular screws: a – monoaxial; b, c, d – polyaxial

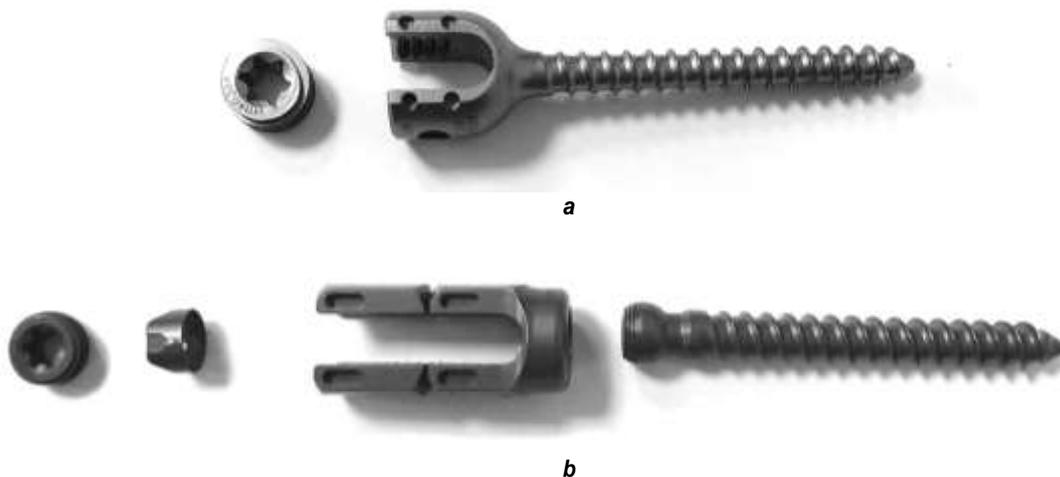


Рис. 2. Конструкция транспедикулярного винта: а – моноосиальный; б – полиосиальный
Fig. 2. Transpedicular screw design: a – monoaxial; b – polyaxial

В качестве конструкционного материала для изготовления рассмотренных винтов применяются титановые сплавы ВТ6 и ВТ1-0 или их зарубежные аналоги [2]. В некоторых случаях на эти сплавы наносится специальное покрытие, например на основе тантала [3]. Покрытие влияет на функциональные качества изделий, но не оказывает существенного влияния на технологию их изготовления.

В последнее время активно проводятся исследования по изготовлению винтов из композитных материалов, однако пока за-

метных преимуществ от использования подобных материалов не выявлено [4]. Это относится и к применению в качестве конструкционных материалов полимеров и керамики [5].

Эксплуатация аддитивных технологий, в частности электронно-лучевой плавки EBM (от англ. Electronic Beam Melting) материала, позволяет повысить производительность процесса. Однако произведенные подобным способом винты имеют худшие показатели при прохождении тестов на вытягивание, чем

произведенные методом обработки резанием изделия [6]. Существенным недостатком является увеличенная концентрация напряжений в поверхностном слое.

Дополнительные ограничения на конструкцию винта накладываются необходимостью прохождения пациентами регулярной процедуры компьютерной томографии. На объективность результатов томографии влияют форма, диаметр и тип покрытия транспедикулярного винта [7].

Форма винта также влияет и на другие важные параметры – силу вытягивания и жесткость. Согласно опубликованным исследованиям, винты конической формы имеют силу вытягивания на 17% больше, чем цилиндрические, а жесткость выше на 50% [8, 9].

Анализ причин поломок винтов показывает, что значительное влияние на прочность оказывают как конструктивные, так и технологические факторы. Например, недостаточный размер радиуса основания резьбы винта приводит к уменьшению усталостной прочности при изгибе с последующей поломкой (рис. 3 а) [10]. Но к аналогичным последствиям может привести и низкое качество обработанной поверхности (рис. 3 б). Как показывают исследования, проведенные рядом авторов, шероховатость обработанной резьбовой поверхности винта должна лежать в пределах параметра шероховатости $R_a = 1...2$ мкм [11, 12].

Классическая технология изготовления винтов, подобных винтам, показанным на рис. 1 и 2, предусматривает обработку на токарном обрабатывающем центре с привод-

ным инструментом и числовым программным управлением. Основными операциями при этом являются точение на проход и нарезание резьбы токарным резцом. Инструментальной промышленностью предлагаются высокопроизводительные инструменты для выполнения указанных операций. Однако применение подобной технологии приводит к ряду проблем. Ввиду низкой жесткости заготовки и обрабатываемого изделия возникают как вибрации, приводящие к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и низкой стойкости инструмента, так и деформации детали, негативно сказывающиеся на точности ее формы. Ситуация усугубляется тем, что титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам. Обработка резанием титановых сплавов сопровождается большими силами резания, высокой температурой в зоне резания, вибрациями. Указанные факторы приводят к ускоренному износу инструмента, низкому качеству обработанной поверхности, снижению ресурса, как изготавливаемого изделия, так и обрабатывающего оборудования [13, 14].

В настоящее время в ряде исследований предлагаются способы, позволяющие снизить негативное воздействие на процесс обработки титана вышеуказанных проблем. В частности, для борьбы с вибрациями предлагается метод модуляции скорости резания [15, 16]. Но данный метод не доведен до стадии промышленного использования ввиду отсутствия внятных рекомендаций по назначению параметров модуляции. Также представляет интерес метод модального анализа,

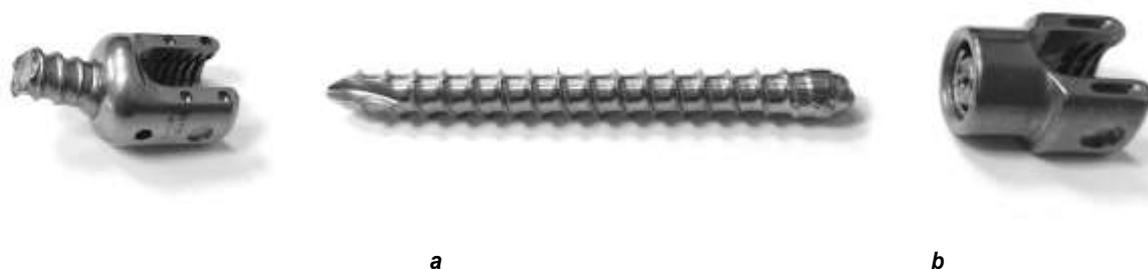


Рис. 3. Виды разрушений транспедикулярных винтов: а – поломка резьбовой части;
б – поломка у основания винта
Fig. 3. Destruction types of transpedicular screws: a – breakage of the threaded part;
b – breakage at the screw base



позволяющий определять области стабильного резания [17, 18]. Данный метод успешно применяется при обработке деталей средних и крупных габаритов, но для мелкогабаритной обработки его использование является проблематичным. Это объясняется малыми размерами, как заготовок, так и режущего инструмента, что затрудняет проведение теста по определению модальных параметров технологической системы.

В свою очередь, исследования, посвященные увеличению производительности лезвийной обработки титановых сплавов, могут успешно применяться при изготовлении транспедикулярных винтов, так как они базируются на выборе оптимальной геометрии режущей части инструмента [19] и на оптимизации режимов резания [20].

Принципиальным решением проблем, связанных как с конструкцией резьбовой части винта, так и с технологией ее обработки, является вихревое нарезание резьбы. Указанный процесс реализуется на токарных полуавтоматах продольного точения, оснащенных специальной приводной головкой (рис. 4). В качестве режущего инструмента ис-

пользуются фрезы со сменными многогранными пластинами (рис. 5). Данная технология обеспечивает следующими преимуществами по сравнению с традиционным нарезанием резьбы токарным резцом: получение высококачественной резьбы на длинных и тонких деталях, низкий риск возникновения вибрации и деформации, нарезание резьбы за один проход без предварительного снятия припуска, возможность обработки различных профилей, сокращение времени цикла и увеличение производительности, хороший контроль над стружкодроблением.

Схема вихревого резьбонарезания приведена на рис. 6. Глубина профиля создается путем движения рабочего органа в направлении + X. Подача осуществляется движением прутка через подающую цангу, вихревая головка при этом остается неподвижной. Возможно нарезание как правой, так и левой резьбы. За счет изменения угла наклона приводной головки появляется возможность увеличить шаг резьбы. Внутренняя подача эмульсии на режущие кромки повышает стойкость инструмента и улучшает эвакуацию стружки, что способствует улучшению

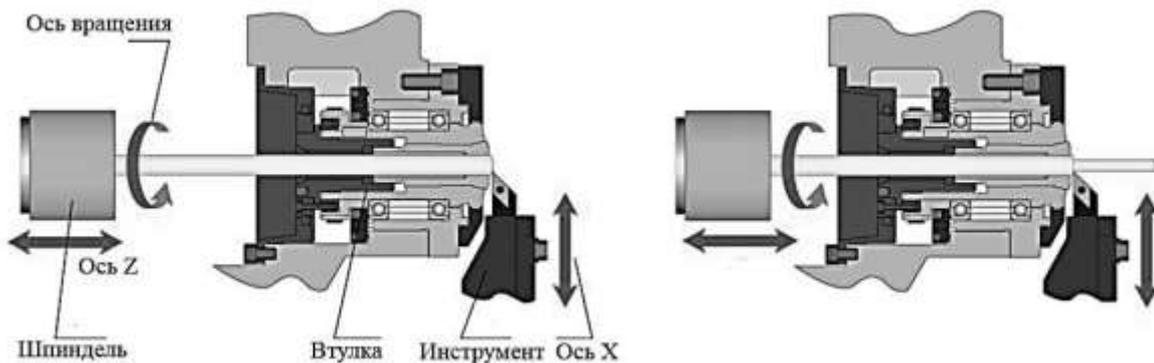


Рис. 4. Токарный станок продольного точения
Fig. 4. Sliding head lathe



Рис. 5. Фреза со сменными многогранными пластинами для вихревого нарезания резьбы
Fig. 5. Cutter with indexable inserts for thread whirling

качества обработанной поверхности. Достигается шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,135$ мкм и высокая точность изготовления профиля резьбы до 8 мкм. Анализ последних разработок в области вихревого резбонарезания показывает, что современный привод головки обеспечивает радиальное и осевое биения в пределах 3 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Высокая конкуренция на рынке имплантов делает применение классической технологии проблематичным и стимулирует производителей к применению инновационных технологических подходов.

В результате анализа установлено, что наиболее применимым материалом для изготовления транспедикулярных винтов является титановый сплав ВТ6 или его зарубежный аналог Ti_6Al_4V . Винты, изготовленные из композитов, полимеров или керамики, имеют более высокую стоимость и не обладают при этом серьезными преимуществами. В качестве титановых заготовок применяются горячекатаные прутки. Применение аддитивных технологий пока не получило широкого распространения ввиду невозможности в настоящее время устранения традиционных для этого процесса недостатков – высокой стоимости, низкого качества поверхности и небольшой по сравнению с лезвийной обработкой прочностью изделий. Исследования в данном направлении продолжаются и фоку-

сируются на комбинировании аддитивных технологий с различными видами механической обработки.

Оптимальным оборудованием для изготовления винтов являются токарные полуавтоматы с продольной подачей прутка при условии их соответствующей комплектации. Обязательным элементом такого станка является приводная головка для вихревого нарезания резьбы. Ключевым элементом технологического процесса является формирование резьбовой поверхности винта. Использование для выполнения этой операции специальных фрез со сменными многогранными пластинами позволяет повысить производительность обработки не менее чем в 2 раза, обеспечить точность формы до 8 мкм и шероховатость обработанной поверхности до $R_a = 0,137$ мкм. Также указанная технология позволяет избежать таких негативных явлений как разупрочнение поверхности в результате воздействия высоких температур и обеспечивает лучшее напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Однако следует иметь в виду, что технологические рекомендации по выбору геометрии сменных пластин, защитного покрытия и расчета режимов резания относятся к зарубежным титановым сплавам. Учитывая разницу в обрабатываемости резанием между зарубежными титановыми сплавами и их отечественными аналогами, требуются дополнительные исследования и опытные работы.

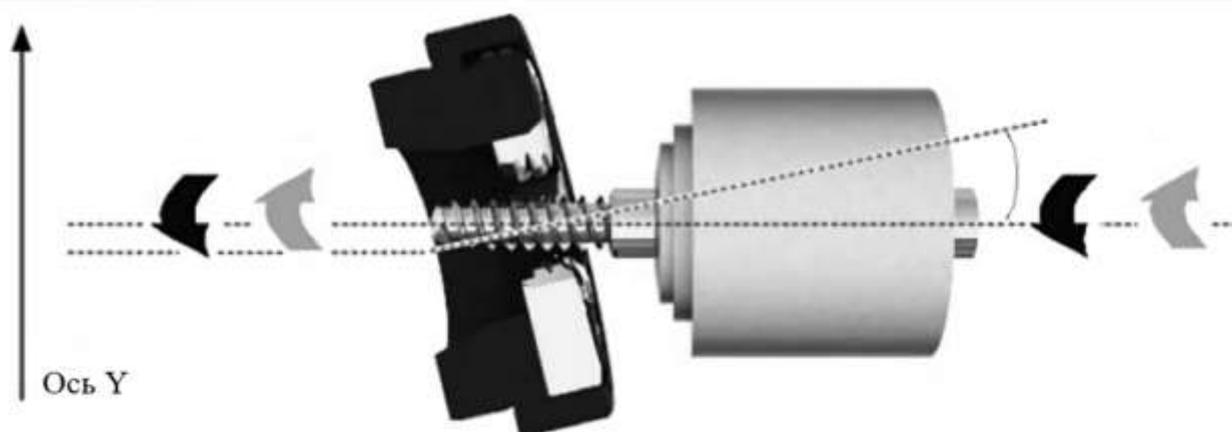


Рис. 6. Схема вихревого резбонарезания
Fig. 6. Thread whirling application scheme



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был выполнен конструктивный и технологический анализ транспедикулярных винтов, применяемых при операциях на позвоночнике. Рассмотрены особенности конструкции винтов и их влияние на функциональные свойства изделия. Выявлено, что механообработка винтов на токарных полуавтоматах продольного точения с приводной головкой для вихревого резьбонарезания обеспечивает максимальную производительность про-

цесса при заданном качестве изделия. Результаты анализа могут быть использованы при организации производства транспедикулярных винтов на базе отечественных машиностроительных предприятий.

Требуется проведение дополнительных исследований для разработки технологических рекомендаций по выбору инструмента и назначению режимов резания при использовании в качестве конструкционного материала отечественных титановых сплавов.

Список литературы

1. Savilov A.V., Svinin V.M., Timofeev S.A. Studies on titanium alloy turning rate improvement // Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2019. P. 1027–1033. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_109
2. Lam Tu-Ngoc, Trinh Minh-Giam, Huang Chih-Chieh, Kung Pei-Ching, Huang Wei-Chin, Chang Wei, et al. Investigation of bone growth in additive-manufactured pedicle screw implant by using Ti-6Al-4V and bioactive glass powder composite // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21. Issue 20. <https://doi.org/10.3390/ijms21207438>
3. Shi Liang-Yu, Wang An, Zang Fa-Zhi, Wang Jian-Xi, Pan Xian-Wei, Chen Hua-Jiang, et al. Tantalum-coated pedicle screws enhance implant integration // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2017. Vol. 160. P. 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.08.059>
4. Becker Y.N., Motsch N., Hausmann J., Breuer U.P. Hybrid composite pedicle screw - finite element modelling with parametric optimization // Informatics in Medicine Unlocked. 2020. Vol. 18. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100290>
5. Kang Kyoung-Tak, Koh Yong-Gon, Son Juhyun, Yeom Jin S., Park Joon-Hee, Kim Ho-Joong. Biomechanical evaluation of pedicle screw fixation system in spinal adjacent levels using polyetheretherketone, carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone, and traditional titanium as rod materials // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 130. P. 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.052>
6. Rosa G., Clienti C., Mineo R., Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. P. 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.159>
7. Le Cann S., Tudisco E., Turunen M.J., Patera A., Mokso R., Tägil M., et al. Investigating the mechanical characteristics of bone-metal implant interface using in situ synchrotron tomographic imaging // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2019. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00208>
8. Abshire B.B., McLain R.F., Valdevit A., Kambic H.E. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out // Spine Journal. 2001. Vol. 1. Issue 6. P. 408–414. [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(01\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(01)00119-X)
9. Shea T.M., Laun J., Gonzalez-Blohm S.A., Doulergis J.J., Lee William E., Aghayev K., et al. Designs and techniques that improve the pullout strength of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: current status // BioMed Research International. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/748393>
10. Kubiak A.J., Lindqvist-Jones K., Dearn K.D., Duncan E.T. Shepherd. Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 95. P. 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.023>
11. Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Issue 13. Part 2. P. 26622–26627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.126>
12. Wu D., Spanou A., Diez-Escudero A., Persson C. 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: a feasibility study using fused deposition modeling // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020. Vol. 103. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>
13. Balaji J.H., Krishnaraj V., Yogesvaraj S. Investigation on high speed turning of titanium alloys // Procedia Engineering. 2013. Vol. 64. P. 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>
14. Krainev D.V., Polyanchikova M.Yu., Bondarev A.A. Influence of the surface layer characteristics on the regularities of the cutting process // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Web of Conferences. 2017. No. 3. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>
15. Altintas Y., Chan P.K. In-process detection and suppression of chatter in milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. Issue 3. P. 329–347. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90006-3)
16. Svinin V.M., Astakhov D.M. Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill // Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill: Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012111>
17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. Issue 9. P. 1455–1473.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>
18. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. Issue 9. P. 1455–1485.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.006>
19. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P., Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research Results Of Stress-Strain State Of Cutting Tool When Aviation Materials Turning // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>
20. Budak E., Kops L. Improving Productivity and Part Quality in Milling of Titanium Based Impellers by Chatter Suppression and Force Control // *CIRP Annals*. 2000. Vol. 49. Issue 1. P. 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62890-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62890-X)

References

1. Savilov AV, Svinin VM, Timofeev SA. Studies on titanium alloy turning rate improvement. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*. 2019;1027–1033. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_109
2. Lam Tu-Ngoc, Trinh Minh-Giam, Huang Chih-Chieh, Kung Pei-Ching, Huang Wei-Chin, Chang Wei, et al. Investigation of bone growth in additive-manufactured pedicle screw implant by using Ti-6Al-4V and bioactive glass powder composite. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(20). <https://doi.org/10.3390/ijms21207438>
3. Shi Liang-Yu, Wang An, Zang Fa-Zhi, Wang Jian-Xi, Pan Xian-Wei, Chen Hua-Jiang, et al. Tantalum-coated pedicle screws enhance implant integration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2017;160:22–32. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.08.059>
4. Becker YN, Motsch N, Hausmann J, Breuer UP. Hybrid composite pedicle screw – finite element modelling with parametric optimization. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2020;18. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100290>
5. Kang Kyoung-Tak, Koh Yong-Gon, Son Juhyun, Yeom Jin S., Park Joon-Hee, Kim Ho-Joong. Biomechanical evaluation of pedicle screw fixation system in spinal adjacent levels using polyetheretherketone, carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone, and traditional titanium as rod materials. *Composites Part B: Engineering*. 2017;130:248–256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.052>
6. Rosa G, Clienti C, Mineo R, Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws. *Procedia Structural Integrity*. 2016;2:1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.159>
7. Le Cann S, Tudisco E, Turunen MJ, Patera A, Mokso R, Tägil M, et al. Investigating the mechanical characteristics of bone-metal implant interface using in situ synchrotron tomographic imaging. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00208>
8. Abshire BB, McLain RF, Valdevit A, Kambic HE. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out. *Spine Journal*. 2001;1(6):408–414. [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(01\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(01)00119-X)
9. Shea TM, Laun J, Gonzalez-Blohm SA, Dougeris JJ, Lee William E, Aghayev K, et al. Designs and techniques that improve the pullout strength of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: current status. *BioMed Research International*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/748393>
10. Kubiak AJ, Lindqvist-Jones K, Dearn KD, Duncan ET, Shepherd. Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw. *Engineering Failure Analysis*. 2019;95:96–106. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.023>
11. Kemény A, Hajdu I, Károly D, Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(13-2):26622–26627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.126>
12. Wu D, Spanou A, Diez-Escudero A, Persson C. 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: a feasibility study using fused deposition modeling. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;103. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>
13. Balaji JH, Krishnaraj V, Yogesvaraj S. Investigation on high speed turning of titanium alloys. *Procedia Engineering*. 2013;64:926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>
14. Krainev DV, Polyanchikova MYu, Bondarev AA. Influence of the surface layer characteristics on the regularities of the cutting process. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Web of Conferences*. 2017;129(3). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>
15. Altintas Y, Chan PK. In-process detection and suppression of chatter in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1992;32(3):329–347. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90006-3)
16. Svinin VM, Astakhov DM. Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill. In: *Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill: Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012111>
17. Roukema JC, Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(9):1455–1473. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>
18. Roukema JC, Altintas Yu. Generalized modeling of



drilling vibrations. Part II: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(9):1455–1485.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.006>

19. Serebrennikova AG, Nikolaeva EP, Savilov AV, Timofeev SA, Pyatykh AS. Research results of stress-strain

state of cutting tool when aviation materials turning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

20. Budak E, Kops L. Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control. *CIRP Annals*. 2000;49(1):31–36. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62890-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62890-X)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Савилов Андрей Владиславович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: saw@ex.istu.edu

Пятых Алексей Сергеевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: pyatykhas@ex.istu.edu

Тимофеев Сергей Анатольевич,

младший научный сотрудник кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: sevans@ex.istu.edu

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 05.09.2020; одобрена после рецензирования 09.11.2020; принята к публикации 15.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Savilov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Production
Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: saw@ex.istu.edu

Aleksey S. Pyatykh,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Production
Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: pyatykhas@ex.istu.edu

Sergey A. Timofeev,

Junior Researcher of the Department of Mechanical
Engineering Production
Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: sevans@ex.istu.edu

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 05.09.2020; approved after reviewing 09.11.2020; accepted for publication 15.12.2020.