

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Обеспечение безопасных условий токарной обработки крупногабаритных деталей из титановых сплавов на основании регулирования величины усадки стружки / Т.В. Ломаева, С.Д. Кугультинов, И.В. Попов, В.И. Свиричев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 35–40. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.05

Please cite this article in English as:

Lomaeva T.V., Kugultinov S.D., Popov I.V., Svirshev V.I. Investigation of the structure and properties of non-metallic inclusions in steels. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 35-40. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.05

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 24, № 1, 2022**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.05

УДК 621.91.01

**Т.В. Ломаева<sup>1</sup>, С.Д. Кугультинов<sup>1</sup>, И.В. Попов<sup>2</sup>, В.И. Свиричев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет

имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>АО «Воткинский завод», Воткинский, Российская Федерация,

<sup>3</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
НА ОСНОВАНИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ УСАДКИ СТРУЖКИ**

На основании анализа результатов экспериментальных исследований зависимости температуры резания и поперечной усадки стружки от скорости резания приводится методика назначения скорости резания при черновом точении и растачивании крупногабаритных деталей ракетной техники из титанового сплава ВТ6 с учетом обеспечения безопасных условий обработки на основании регулирования величины усадки стружки. В отличие от большинства конструкционных материалов, усадка стружки у титановых сплавов может быть «отрицательной». То есть может происходить утонение стружки. Это в некоторых случаях может быть опасным, так как образование тонкой стружки и тем более пыли в процессе стружкообразования приводит к ее воспламенению с интенсивным горением. Одним из главных факторов, влияющих на производительность механической обработки, является скорость резания, чем выше скорость, тем выше производительность. Однако при обработке крупногабаритных деталей ракетной техники на предприятии в настоящее время используются металлорежущее оборудование, не имеющие системы охлаждения. Таким образом, во избежание образования «отрицательной» стружки и ее воспламенения необходимо тщательно подбирать режимы резания. В результате исследований установлено, что в зависимости от назначаемой скорости резания необходимо выбирать подачу режущего инструмента таким образом, чтобы толщина получаемой стружки с учетом величины усадки стружки была бы больше 0,07 мм. Для достижения требуемой величины шероховатости обрабатываемой поверхности, в случае увеличения подачи режущего инструмента, необходимо геометрическим образом выбирать величину радиуса скругления при вершине резца.

**Ключевые слова:** обработка резанием титановых сплавов, сила резания, температура резания, скорость резания, черновое точение, пластическая деформация, коэффициент усадки стружки, экспериментальные исследования, методика выбора режимов резания, «отрицательная» стружка.

T.V. Lomaeva<sup>1</sup>, S.D. Kugultinov<sup>1</sup>, I.V. Popov<sup>2</sup>, V.I. Svirschev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation,

<sup>2</sup>JSC Votkinsk plant, Votkinsk, Russian Federation,

<sup>3</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEELS

**Abstract** In the article, based on the analysis of the results of experimental studies of the dependence of the cutting temperature and transverse shrinkage of the chips on the cutting speed, a method is given for assigning the cutting speed during rough turning and boring of large-sized parts of rocket technology from titanium alloy VT6, taking into account the provision of safe processing conditions based on regulating the amount of shrinkage of the chips. Unlike most structural materials, chip shrinkage in titanium alloys can be "negative". That is, thinning of the shavings can occur. In some cases, this can be dangerous, since the formation of fine chips and, moreover, dust in the process of chip formation leads to its ignition with intense combustion. One of the main factors affecting the productivity of machining is the cutting speed, the higher the speed, the higher the productivity. However, when processing large-sized parts of rocket technology, the enterprise currently uses metal-cutting equipment that does not have a cooling system. Thus, in order to avoid the formation of "negative" chips and their ignition, it is necessary to carefully select the cutting conditions. As a result of the research, it was found that, depending on the assigned cutting speed, it is necessary to select the feed of the cutting tool in such a way that the thickness of the resulting chips, taking into account the amount of shrinkage of the chips, would be greater than 0.07 mm. To achieve the required roughness of the machined surface, in the case of an increase in the feed of the cutting tool, it is necessary to geometrically select the value of the rounding radius at the tip of the cutter.

**Keywords:** machining by cutting titanium alloys, cutting force, cutting temperature, cutting speed, rough turning, plastic deformation, chip shrinkage ratio, experimental studies, method of choosing cutting modes, "negative" chips.

Развитие промышленности неразрывно связано с использованием материалов, отвечающих высоким эксплуатационным требованиям по надежности и качеству. Уникальные свойства титановых сплавов обуславливают все большее их применение в различных отраслях промышленности для изготовления ответственных деталей, подвергающихся при эксплуатации знакопеременным нагрузкам при действии достаточно высоких температур [1]. Эти сплавы, обладая высокой удельной прочностью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью, сочетают в себе комплекс важных физико-механических и химических свойств, выгодно отличающих их от сплавов на основе железа, никеля, алюминия и других металлов.

Титановые сплавы с их высокой удельной прочностью  $\left(\frac{\sigma_{0,2}}{\gamma}\right)$  широко используются для изготовления многих важных деталей и узлов ракетной техники: лопаток, дисков, корпусов компрессора, которые в рабочих условиях испытывают значительные знакопеременные нагрузки при повышенных температурах.

Вследствие этого к деталям, узлам, агрегатам, изготовленным из титановых сплавов, предъявляются высокие требования в отношении усталостной прочности, надежности и других характеристик. Поэтому очень важно при выполнении операций технологических процессов обработки деталей из титановых сплавов обеспечивать необходимое качество их поверхностного слоя, поскольку состояние этого слоя в значительной степени определяет способность деталей удовлетворять эксплуатационным требованиям [2; 3].

Несмотря на последние разработки и широкое использование титановых сплавов, их механическая обработка по-прежнему остается серьезной промышленной проблемой, поскольку такие сплавы классифицируются как труднообрабатываемые материалы (износ инструмента, вибрации, низкие скорости удаления металла и т.д.). Основные причины относительно низкой обрабатываемости титановых сплавов обусловлены их низкой теплопроводностью, высокой химической реакционной способностью и низким модулем упругости [1; 4–6]. Они характеризуются высокой температурой резания, коротким сроком службы инструмента и высоким уровнем вибрации инструмента [1; 5–16].

Кроме того, если титановые сплавы при умеренно повышенной температуре характеризуются высокой коррозионной стойкостью на воздухе, то при дальнейшем повышении температуры они оказываются чрезвычайно активными по отношению к водороду, кислороду и азоту воздуха, взаимодействие с которыми происходит начиная с 500–600 °C [7], что значительно ухудшает механические свойства поверхностного слоя титановых сплавов.

Характеризуя влияние структурных особенностей титановых сплавов на процесс резания, авторы исследований [7; 17; 18] отмечают, что свойство титана и его сплавов активно взаимодействовать при повышенных температурах с атмосферными газами представляет одну из характерных и наиболее отрицательных особенностей этих материалов, которую необходимо учитывать при осуществлении процесса резания. Поскольку при этом возникают высокие температуры, значительно превышающие те, при которых титан начинает активно реагировать с кислородом и азотом воздуха.

Исследования проводились при обработке титанового сплава ВТ6. Выбор марки материала обусловлен тем, что, около 50 % используемого в авиакосмической промышленности титана [19] приходится именно на сплав ВТ6. Такое широкое распространение этого сплава объясняется удачным легированием.

По данным [20], титановый сплав ВТ6, получаемый путем легирования титана алюминием (5,5–7,0 %) и ванадием (4,2–6,0 %), относится к ( $\alpha + \beta$ )-сплавам. ( $\alpha + \beta$ )-сплавы более прочны, чем однофазные, хорошо куются и штампуются, поддаются термической обработке, охрупчиваются лишь при некоторых условиях термической обработки (появляется  $\omega$ -фаза).

Как отмечают исследователи [18; 21], титановый сплав ВТ6, как и большинство сложнолегированных титановых сплавов, отличается сравнительно низкой обрабатываемостью резанием, на которую влияют:

- химический состав, включающий элементы с высокой энергией активации (титан, ванадий) и повышающие предел прочности, что ведет к снижению обрабатываемости;

- низкий коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,018 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}}$ , что в 4–8 раз меньше, чем, например, у стали 40 и у твердого сплава ВК8. Это создает неблагоприятный баланс тепла и высокую температуру в зоне резания, что влияет на стойкость режущего инструмента.

Процесс протекания пластических деформаций у титановых сплавов весьма интересен. Как указывается в работах [22–25], у титановых сплавов из-за их активного взаимодействия с кислородом и азотом усадка стружки может быть отрицательной, т.е. может происходить утонение стружки. А это в некоторых случаях может быть опасным, так как стружка при малом сечении ( $t \times S = 0,05 \times 0,07$  мм) пожароопасна, она вос-

пламеняется при температуре 700–800 °С, а стружка, загрязненная маслами, способна к самовозгоранию с интенсивным горением. Также возникает опасность взрыва пыли с концентрацией выше 50 г титана на 1 м<sup>3</sup> воздуха. Температура воспламеняемости титановой пыли 400–600 °С. Следовательно, необходимо обеспечить выбор режимов резания таким образом, чтобы температура резания не превышала 600–650 °С [23], во избежание возможности возгорания стружки в процессе механической обработки резанием.

Результаты экспериментальных исследований [15; 26] показывают, что температура резания титанового сплава достигает 800 °С уже при  $V = 40$  м/мин,  $S = 0,17$  мм/об и  $t = 1,5$  мм; при резании же стали 45, по данным исследования [27], аналогичная температура возникает при значительно более высоких параметрах режима резания, а именно:  $V = 100$  м/мин,  $S = 0,29$  мм/об и  $t = 2$  мм.

Сравнение полученных результатов в работе [26] с данными, приведенными в исследовании [28], показывает, что температура при резании титанового сплава ВТ3-1 в среднем в 2 раза выше температуры резания стали 40Х и в 3–4 раза выше температуры, возникающей при обработке алюминиевых сплавов. Это свидетельствует о том, что резание титановых сплавов характеризуется весьма высокими температурами, при этом скорость резания оказывает более существенное влияние на температуру резания, нежели глубина и подача [5].

Одним из главных факторов, влияющих на производительность механической обработки, является скорость резания: чем выше скорость, тем выше производительность. Однако при обработке крупногабаритных деталей ракетной техники на предприятии в настоящее время используется металлорежущее оборудование, не имеющее системы охлаждения. Таким образом, во избежание образования отрицательной стружки и ее воспламенения необходимо тщательно подбирать режимы резания.

Таблица 1

Влияние скорости резания на величину усадки стружки при обработке титанового сплава ВТ6 [28]

$V$ , м/мин	$a_{\text{стр}}$				$a_{\text{ср.сл.}}$	$\xi_a$
	1	2	3	среднее		
9,42	0,22	0,225	0,21	0,218333	0,106065	2,058486
11,9	0,19	0,18	0,195	0,188333	0,106065	1,775641
15	0,17	0,15	0,16	0,16	0,106065	1,508509
23,5	0,115	0,12	0,14	0,125	0,106065	1,178523
30,1	0,12	0,11	0,125	0,118333	0,106065	1,115668
37,7	0,1	0,11	0,1	0,103333	0,106065	0,974245
47,1	0,1	0,1	0,105	0,101667	0,106065	0,958532
59,3	0,09	0,095	0,095	0,093333	0,106065	0,879964

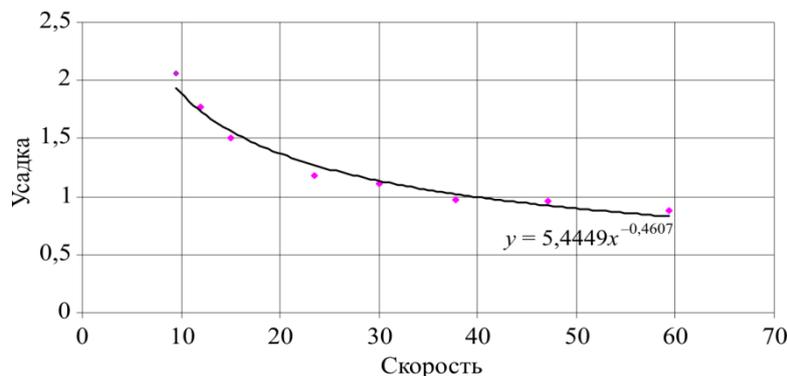


Рис. Зависимость коэффициента поперечной усадки стружки от скорости резания при обработке титанового сплава ВТ6 (глубина резания  $t = 1,5$  мм; подача  $S_o = 0,15$  мм/об) [28]

В работе [25] приведена эмпирическая зависимость температуры резания от скорости резания при обработке титанового сплава ВТ6, полученная на основе экспериментальных исследований.

$$T = 106 \cdot V^{0,6} \quad (1)$$

В исследовании [28] приведены результаты анализа влияния скорости резания на усадку стружки при обтачивании деталей из титанового сплава ВТ-6. Авторами установлено, что с увеличением скорости резания с 10 до 40 м/мин коэффициент усадки стружки плавно уменьшается с 2 до 1, и затем становится меньше 1, т.е. усадка стружки становится отрицательной (рисунок).

После обработки результатов экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента поперечной усадки стружки от скорости резания:

$$\xi = 5,4447 \cdot V^{-0,461} \quad (2)$$

Учитывая приведенные зависимости (1) и (2), можно сделать следующие выводы:

1. В зависимости от назначаемой скорости резания необходимо выбирать подачу режущего инструмента таким образом, чтобы толщина получаемой стружки с учетом величины усадки стружки (таблица) была бы больше 0,07 мм.

2. Для достижения требуемой величины шероховатости обрабатываемой поверхности, в случае увеличения подачи режущего инструмента, необходимо геометрическим образом выбирать величину радиуса скругления при вершине реза.

### Список литературы

1. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов: учебное пособие / Калинингр. ун-т – Калининград, 2000. – 448 с.  
 2. Петруха П.Г. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.

3. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.  
 4. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.  
 5. Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.И. Технология обработки конструкционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2006. – 671 с.  
 6. Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.И. Обработка резанием материалов, применяемых в ракетостроении. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 194 с.  
 7. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов / Н.С. Жучков, П.Д. Беспалотный, А.Д. Чубаров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 152 с.  
 8. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учетом их физико-механических свойств. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 508 с.  
 9. Ezugwu E., Wang Z. Titanium alloys and their machinability – a review // J Mater Process Technol. – 1997. – Vol. 68. – P. 262–274. DOI: 10.1016 / S0924-0136 (96) 00030-1 Google Scholar  
 10. Ezugwu E., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys // J Mater Process Technol. – 2003. – Vol. 134. – P. 233–253. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7  
 11. Rahman M., Wong Y.S., Zareena A.R. Machinability of titanium alloys // JSME Int J Ser C. – 2003. – Vol. 46. – P. 107–115. DOI: 10.1299/jsmec.46.107  
 12. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3) / P.J. Arrazola, A. Garay, L.M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître // J Mater Process Technol. – 2009. – Vol. 209. – P. 2223–2230. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020  
 13. Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов / В.А. Кривоухов, С.В. Егоров, Б.Е. Бруштейн, А.И. Марков, А.Г. Червяков, П.Д. Беспалотный, А.И. Белоусов, А.Д. Чубаров; под ред. В.А. Кривоухова. – М.: Машгиз, 1961. – 244 с.  
 14. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / под ред. Н.И. Резникова. – М.: Машиностроение, 1972. – 199 с.

15. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
16. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов / А.М. Даниелян, П.И. Бобрик, Я.Л. Гуревич, И.С. Егоров; под ред. А.М. Даниеляна. – М.: Машиностроение, 1965. – 308 с.
17. Бармин Б.П. Технология обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов // Технология, организация и механизация механосборочного производства (НИИИНФОРМТЯЖМАШ). – 1972. – № 2.
18. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, Е.В. Бурмистров, И.Г. Жарков, А.С. Зыкин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
19. Titanium [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.titanium-fiko.com.ua/EX\\_R/bars\\_and\\_wire\\_rus.htm](http://www.titanium-fiko.com.ua/EX_R/bars_and_wire_rus.htm) (дата обращения: 27.01.2022).
20. Тернилов И.И. Титан. Источники, составы, свойства, металлургия и применение. – М.: Наука, 1975. – 310 с.
21. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
22. Чубаров А.Д., Новиков Н.Н. Деформирование и роль температурного фактора в процессе резания титановых сплавов // Вестник машиностроения. – 1959. – № 9. – С. 55–59.
23. НПАОП 27.4-1.42-62. Правила безопасности при выплавке и обработке титана и его сплавов (утверждены Президиумом ЦК, профсоюза авиационной и оборонной промышленности 30 июля 1962 года). – М., 1962.
24. Kikuchi M. The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys // Acta Biomater. – 2009. – Vol. 5. – P. 770–775. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.08.016
25. Влияние режимов резания на температуру режущей кромки токарных резцов при обработке титановых изделий / С.В. Жилиев, К.А. Копылов, С.Д. Кугультинов, И.В. Попов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (49). – С. 7–10.
26. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М., Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. – М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 447 с.
27. Саломонович Е.Д. Температура резания при обработке на больших скоростях Сб. «Тепловые явления при обработке металлов резанием» / под ред. Е.А. Панкиной. – М.: НТО Машпром, 1959.
28. Lomaeva T.V., Kugultinov S.D. Investigation of cutting modes effect on cutting force while machining titanium alloy BT6 (Russian State Standard GOST 19807-91) // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38 (4). – P. 1307–1309.
29. Petrukha P.G., Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Cutting hard-to-machine materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 176 p.
30. Tekhnologiya konstruktivnykh materialov: Uchebnik dlia studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostei vuzov [Technology of Structural Materials: Textbook for Mechanical Engineering Students]. A.M. Dal'skii, T.M. Barsukova, L.N. Bukharkin et al. Ed. A.M. Dal'skogo. 5nd. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 512 p.
31. Illarionov A.G., Popov A.A. Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoistva titanovykh spлавov: uchebnoe posobie [Technological and performance properties of titanium alloys]. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2014, 137 p.
32. Kugul'tinov S.D., Koval'chuk A.K., Portnov I.I. Tekhnologiya obrabotki konstruktivnykh materialov [Processing Technology of Structural Materials]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im N.E. Bauman, 2006, 671 p.
33. Kugul'tinov S.D., Koval'chuk A.K., Portnov I.I. Obrabotka rezaniem materialov, primeniaemykh v raketostroenii [Machining of materials used in rocket engineering]. Moscow: MGTU im N.E. Bauman, 2008, 194 p.
34. Povyshenie effektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovykh spлавov [Increasing the efficiency of titanium alloy workpiece machining by cutting]. N.S. Zhuchkov, P.D. Bepakhotnyi, A.D. Chubarov et al. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 152 p.
35. Obrabotka rezaniem stali, zharoprochnykh i titanovykh spлавov s uchetom ikh fiziko-mekhanicheskikh svoistv [Machining of steels, heat-resistant and titanium alloys with regard to their physical and mechanical properties]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2018, 508 p.
36. Ezugwu E., Wang Z. Titanium alloys and their machinability – a review. *Journal Mater Process Technol.*, 1997, vol. 68, pp. 262–274. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)00030-1 Google Scholar
37. Ezugwu E., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal Mater Process Technol.*, 2003, vol. 134, pp. 233–253. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7
38. Rahman M., Wong Y.S., Zareena A.R. Machinability of titanium alloys. *JSME Int J Ser C.*, 2003, vol. 46, pp. 107–115. DOI: 10.1299/jsmec.46.107
39. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). P.J. Arrazola, A. Garay, L.M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître. *Journal Mater Process Technol.*, 2009, vol. 209, pp. 2223–2230. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020
40. Obrabatyvaemost' rezaniem zharoprochnykh i titanovykh spлавov [Machinability of heat-resistant and titanium alloys]. V.A. Krivoukhov, S.V. Egorov, B.E. Brushstein, A.I. Markov, A.G. Cherviakov, P.D. Bepakhotnyi, A.I. Belousov, A.D. Chubarov; pod red. V.A. Krivoukhova. Moscow: Mashgiz, 1961, 244 p.
41. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh, vysokoprochnykh i titanovykh spлавov [Machining of heat-resistant, high-strength and titanium alloys]. Ed. N.I. Reznikova. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 199 p.
42. Krivoukhov V.A., Chubarov A.D. Obrabotka rezaniem titanovykh spлавov [Machining of titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 180 p.

## References

1. Koriagin S.I., Pimenov I.V., Khudiakov V.K. Sposoby obrabotki materialov: uchebnoe posobie [Methods of processing materials]. Kaliningrad, 2000, 448 p.

16. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh stalei, splavov i tugoplavkikh metallov [Machining of heat-resistant steels, alloys and refractory metals] A.M. Danielian, P.I. Bobrik, Ia.L. Gurevich, I.S. Egorov. Ed. A.M. Danieliana. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 308 p.

17. Barmin B.P. Tekhnologiya obrabotki rezani- em detalei iz trudnoobrabatyvaemykh materialov [Technology of machining parts of hard-to-machine materials]. *Tekhnologiya, organizatsiia i mekhanizatsiia mekhanosbo-rochnogo proizvodstva (NIIFORMTlaZhMASh)*, 1972, no. 2.

18. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh, vysoko- prochnykh i titanovykh splavov [Machining of heat-resistant, high-strength and titanium alloys]. N.I. Reznikov, E.V. Burmistrov, I.G. Zharkov, A.S. Zykin et al. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 200 p.

19. Titanium [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.titanium-fiko.com.ua/EX\\_R/bars\\_and\\_wire\\_rus.htm](http://www.titanium-fiko.com.ua/EX_R/bars_and_wire_rus.htm) (data available 27 Janary 2022).

20. Kornilov I.I. Titan. Istochniki, sostavy, svoistva, metallokhimiia i primenenie [Sources, compositions, properties, metallochemistry and applications]. Moscow: Nauka, 1975, 310 p.

21. Solonina O.P., Glazunov S.G. Titanovye splavy. Zharoprochnye titanovye splavy [Titanium alloys. Heat resistant titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 448 p.

22. Chubarov A.D., Novikov N.N. Deformirovanie i rol' temperaturnogo faktora v protsesse rezaniia titanovykh splavov [Deformation and the role of temperature factor in the cutting process of titanium alloys]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1959, no. 9, pp. 55–59.

23. NPAOP 27.4-1.42-62. Pravila bezopasnosti pri vyplavke i obrabotke titana i ego splavov (utverzheny Prezidiumom TsK, profsoiuza aviatsionnoi i oboronnoi promyshlennosti 30 iulia 1962 goda). Moscow, 1962.

24. Kikuchi M. The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys. *Acta Biomater.*, 2009, vol. 5, pp. 770–775. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.08.016

25. Vliianie rezhimov rezaniia na temperaturu rezhushchei kromki tokarnykh reztsov pri obrabotke titanovykh izdelii [Influence of cutting conditions on the cutting edge temperature of lathe cutters when machining titanium products]. S.V. Zhiliaev, K.A. Kopylov, S.D. Kugul'tinov, I.V. Popov. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1 (49), pp. 7–10.

26. Shifrin A.Sh., Reznitskii L.M., Obrabotka rezaniem korrozionnostoikikh, zharoprochnykh i titanovykh stalei i splavov [Machining of corrosion-resistant, heat-resistant and titanium steels and alloys]. Moscow – Leningrad: Mashinostroenie, 1964, 447 p.

27. Salomonovich E.D. Temperatura rezaniia pri obrabotke na bol'shikh skorostiakh [Cutting temperature when machining at high speeds]. Sb. «Teplovyie iavleniia pri obrabotke metallov rezaniem». Ed. E.A. Pankinoin. Moscow: NTO Mashprom, 1959.

28. Lomaeva T.V., Kugultinov S.D. Investigation of cutting modes effect on cutting force while machining titanium alloy BT6 (Russian State Standard GOST 19807-91). *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38 (4), pp. 1307–1309.

Поступила: 14.09.2021

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

### Сведения об авторах

**Ломаева Татьяна Викторовна** (Ижевск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Технология производства систем вооружения» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7, e-mail: [lomaeva@yandex.ru](mailto:lomaeva@yandex.ru)).

**Кугультинов Сергей Данилович** (Ижевск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология производства систем вооружения» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Россия, 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7, e-mail: [kugultinov2015@mail.ru](mailto:kugultinov2015@mail.ru)).

**Попов Иван Владимирович** (Воткинск, Россия) – заместитель главного технолога АО «Воткинский завод» (Россия, 427430, Воткинск, ул. Кирова, 2, e-mail: [ivaporov@yandex.ru](mailto:ivaporov@yandex.ru)).

**Свирищев Валентин Иванович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Инновационные технологии машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: [svirshchev\\_vi@pstu.ru](mailto:svirshchev_vi@pstu.ru)).

### About the authors

**Tatyana V. Lomaeva** (Izhevsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Technology of Weapon Systems Production, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, 426069, Russian Federation, e-mail: [lomaeva@yandex.ru](mailto:lomaeva@yandex.ru)).

**Sergei D. Kugultinov** (Izhevsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of Production of Weapon Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, 426069, Russian Federation, e-mail: [kugultinov2015@mail.ru](mailto:kugultinov2015@mail.ru)).

**Ivan V. Popov** (Votkinsk, Russian Federation) – Deputy Chief Technologist of JSC "Votkinsk Plant" (2, Kirov str., Votkinsk, 427430, Russian Federation, e-mail: [ivaporov@yandex.ru](mailto:ivaporov@yandex.ru)).

**Valentin I. Svirshchev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: [svirshchev\\_vi@pstu.ru](mailto:svirshchev_vi@pstu.ru)).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.