



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.013

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## Титановый сплав VT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента

© А.Г. Серебренникова, В.Б. Гурылев

*Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

**Резюме:** Цель – установить влияние переднего угла  $\gamma$  (в диапазоне от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$  при постоянном заднем угле  $\alpha+6^\circ$ ) токарного резца из твердого сплава ВК8 на выходные параметры (силу резания, шероховатость, износ режущей кромки по передней и задней поверхностям) при точении заготовки из титанового сплава VT22. Для определения сил резания использовался динамометрический анализ с помощью лабораторного стенда STD.201-1. Точение заготовки производилось при постоянной скорости резания равной 50 м/мин, глубине резания 3 мм и при значениях подачи движения резца вдоль заготовки 0,11, 0,15, 0,21 мм/об. Измерение шероховатости производилось профилометром TR200, износ режущей кромки – при помощи измерительной машины Micro Vu-Sol-1. Установлено, что наибольшее значение (2000 Н) тангенциальной силы резания достигнуто при подаче равной 0,21 мм/об, при этом зафиксирован самый большой перепад (равный 400 Н) значений тангенциальной силы резания в зависимости от изменения значений  $\gamma$  в диапазоне от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$ . При подаче 0,11 мм/об такой перепад составил 300 Н, при подаче 0,15 мм/об – 100 Н. Измеренная при заданных значениях подачи шероховатость находится в допустимых пределах чистоты поверхности, соответствующей 8–9 классу чистоты (кроме  $\gamma = +10^\circ$ ). По полученным результатам рекомендован выбор значений режимов токарной обработки заготовок из титанового сплава VT22 по различным критериям: фиксированной тангенциальной силе резания – подача 0,11 мм/об ( $\gamma = +10^\circ$ ); значениям шероховатости – подача 0,11 и 0,21 мм/об (при всех выбранных значениях  $\gamma$ ) или 0,15 мм/об (для  $\gamma = -4, 0, +4, +8^\circ$ ); износу режущей кромки – подача 0,11 мм/об при  $\gamma$  от  $-8^\circ$  до  $-2^\circ$ , 0,15 мм/об (при  $\gamma = -4^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ), 0,21 мм/об (при  $\gamma = -4^\circ, -2^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ).

**Ключевые слова:** точение, титан, геометрия инструмента, износ инструмента, силы резания, шероховатость поверхности

**Информация о статье:** Дата поступления 02 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 08 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Серебренникова А.Г., Гурылев В.Б. Титановый сплав VT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 548–560. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process

Anzhela G. Serebrennikova, Vladimir B. Gurylyov

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia*

**Abstract:** The aim of the present work consists in studying the effect of the rake angle (in the range from  $-8^\circ$  to  $+10^\circ$  with a constant relief angle of  $+6^\circ$ ) of a VK8 hard material turning tool on the output parameters (cutting force, roughness, wear of the cutting edge at the rake and flank surfaces) in turning a VT22 titanium alloy billet. In order to determine the cutting forces, a dynamometric analysis was performed using the STD. 201-1 laboratory bench. The turning of the billet was carried out at a constant cutting speed of 50 m/min, a cutting depth of 3 mm and feed values of the tool movement along the billet equal to 0.11, 0.15 and 0.21 mm/rev. A TR200 profilometer and Micro Vu-Sol-1 measuring machine were applied for determining the roughness and wear of the cutting edge, respectively. The highest value (2000 N) of the tangential cutting force was established to be achieved with a 0.21 mm/rev feed, while the largest difference (400 N) of the tangential cutting force was recorded depending on the  $\gamma$  value variation in the range from  $-8^\circ$  to  $+10^\circ$ . For a feed rate of 0.11 and 0.15 mm/rev, this difference amounted to 300 and 100 N, respectively. The roughness measured

at specified feed values lies within the acceptable range of surface cleanliness corresponding to 8–9 grade (except for  $\gamma = +10^\circ$ ). Based on the results, the following mode selection algorithm for turning of a VT22 titanium alloy billet is proposed according to various criteria: fixed tangential cutting force – 0.11 mm/rev feed rate ( $\gamma = +10^\circ$ ); roughness values – 0.11 and 0.21 mm/rev feed rate (for all selected  $\gamma$  values) or 0.15 mm/rev (for  $\gamma = -4, 0, +4, +8^\circ$ ); wear of the cutting edge – feed rate of 0.11 mm/rev at  $\gamma$  from  $-8^\circ$  to  $-2^\circ$ , 0.15 mm/rev (at  $\gamma = -4^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ), 0.21 mm/rev (at  $\gamma = -4^\circ, -2^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ).

**Keywords:** turning, titanium, cutting tool geometry, cutter wear, cutting forces, surface roughness

**Information about the article:** Received April 02, 2020; accepted for publication May 08, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Serebrennikova AG, Gurylyov VB. VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):548–560. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Обработка металлов резанием – наиболее распространенная и трудоемкая часть работ, совершаемых при изготовлении деталей машин. Поэтому снижение затрат труда и времени на ее выполнение является одним из главных направлений дальнейшего увеличения производительности в современном машиностроении. Решение этих задач путем исследования явлений и закономерностей при резании, совершенствование конструкций и геометрии режущих инструментов, а также создание новых, более эффективных способов обработки составляют основное содержание науки о резании металлов.

Изучение процессов токарной обработки титановых сплавов имело свое развитие<sup>1-3</sup> [2–9]. Так как титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам, их обработка сопряжена с определенными проблемами, отчасти возникающими оттого, что высокопроизводительная механическая обработка титана – новая область, и в ней не накоплено достаточно опыта. Ограниченное количество исследований посвящено высокопроизводительному точению титановых сплавов, и только в некоторых из них рассмотрены отечественные титановые сплавы, которые по своим механическим свойствам и обрабатываемости

резанием отличаются от зарубежных [10–16]. Как правило, авторы концентрируют внимание на исследовании зависимости выходных параметров обработки, таких как силы резания, вибрации, качество обработанной поверхности от параметров обработки и геометрии режущей части инструмента. Геометрия режущей части токарного инструмента и режимы резания должны быть оптимальными, с целью обеспечения экономически обоснованной стойкости режущей кромки инструмента и достижения заданной шероховатости поверхности.

Согласно литературным источникам [4–9], вопросы влияния геометрии режущей части на процесс обработки находились в фокусе исследований длительное время. Но данные исследования посвящены вопросам точения материалов, которые были актуальны в промышленности в тот период и в настоящее время, либо не так часто применяются, или вообще сняты с производства.

Следует также заметить, что геометрия токарных инструментов для высокопроизводительной обработки отличается от геометрии классических резцов [17–25]. Также отличаются стратегия обработки и принципы расчета режимов резания. Следовательно, закономерности и зависимости, полученные ранее для классической обработки, требуют корректировки и до-

<sup>1</sup> Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.

<sup>2</sup> Петрушин С.И. Введение в теорию несвободного резания материалов: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 1999. 97 с.

<sup>3</sup> Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. Изд. 2-е, перераб и доп. М: Машиностроение, 1986. 240 с.



полнительных исследований для последующего использования в реальном производстве.

Титановые сплавы последнего поколения ВТ20, ВТ22, ВТ23 в основном применяются в авиационной и ракетной промышленности, судостроении. В авиационной технике, где стремятся получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью, из титановых сплавов изготавливают обшивку, детали крепления, силовой набор, фитинги, центроплан, детали шасси, карданы и прочие агрегаты. Также данные материалы применяются в конструкциях авиационных реактивных двигателей.

Задача исследования заключалась в определении зависимостей выходных параметров от геометрии инструмента и режимов резания при точении титанового сплава ВТ22 на универсальном оборудовании с применением современной исследовательской аппаратуры. К выходным параметрам относятся силы резания в трех направлениях ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ), температура ( $T$ ), шероховатость поверхности ( $R_a$ ) и износ инструмента по задней поверхности ( $h_3$ ).

## 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Титановый деформируемый сплав ВТ22 используется для получения высоконагруженных деталей и конструкций, длительно работающих до температур 350—400°C (силовые детали фюзеляжа, крыла, штамповки, детали системы управления, крепежные детали типа ушковых болтов).

Сплав ВТ22 ( $\alpha + \beta$ )-класса относится к сильнолегированным высокопрочным сплавам системы Ti–Al–Mo–V–Fe–Cr. Структура и свойства сплава ВТ22 зависят от колебания химического состава в пределах, установленных техническими условиями. По структуре в закаленном состоянии

– это сплав переходного класса.

Наличие хрома в составе сплава ВТ22 повышает его сопротивление коррозии, а вместе с молибденом и ванадием значительно влияет на прочность и твердость сплава. Эти свойства, которые придают ВТ22 статус наиболее подходящего материала для изготовления деталей, оказывают значительный эффект на его обрабатываемость. В результате обработка сопровождается высокими и концентрированными силами, действующими на режущую кромку. Это часто приводит к вибрациям при резании и к быстрому износу режущей кромки инструмента.

Для проведения эксперимента применялся лабораторный стенд STD.201-1 (рис. 1), который представляет собой динамометр с программным обеспечением. Динамометр предназначен для проведения научно-исследовательских и лабораторных работ с целью изучения динамических, вибрационных и тепловых процессов, протекающих при резании металлов в различных режимах токарных станков [1].

Для измерения динамометрических данных по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , проекций виброскопления  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ , сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  в динамометр устанавливают режущий инструмент, заготовку закрепляют в патроне станка. При вращении заготовки детали и перемещении динамометра с резцом относительно заготовки осуществляется резание с заданной глубиной, что сопровождается регистрацией составляющих сил резания по указанным осям, регистрацией вибраций в направлениях указанных осей.

В качестве режущего инструмента был выбран токарный резец подрезной отогнутый с напайными пластинами из твердого сплава ВК8 (ГОСТ 18880-73<sup>4</sup>). В литературных источниках отмечено, что передний угол  $\gamma$  оказывает ключевое влияние на процесс резания [2–9].

<sup>4</sup>ГОСТ 18880-73. Резцы токарные подрезные отогнутые с пластинами из твердого сплава. Конструкция и размеры. Введ. постановлением № 1429 Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 01.07.1974. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003.



Рис. 1. Лабораторный стенд для исследования сил резания  
 Fig. 1. Laboratory test bench for studying cutting forces

Всего было задействовано 10 таких резцов (рис. 2) с передним углом  $\gamma$ , изменяющимся от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$  с шагом  $2^\circ$  (таблица). Задний угол при этом был постоянным и составлял  $\alpha = 6^\circ$ . Главный угол в плане  $\varphi = 90^\circ$ .

Значения данных геометрических параметров были выбраны с целью проверки гипотезы влияния переднего и заднего углов, приведенной в работе [25], на динамику резания и стойкость инструмента.

Влияние переднего и заднего углов на процесс резания и принципы их выбора описаны в литературных источниках [4, 8–9, 18–20]. Передний угол влияет на силу резания через изменение условий деформации. С увеличением переднего угла (уменьшением угла резания) увеличивается угол сдвига, уменьшается коэффициент усадки стружки, а, следовательно, и сила резания.

**Геометрия режущего инструмента для проведения экспериментов**  
**Geometry of the cutting tool for experiments**

Номер резца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Задний угол $\alpha, ^\circ$	+6									
Передний угол $\gamma, ^\circ$	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10



Рис. 2. Токарные подрезные отогнутые резцы  
 Fig. 2. Turning bent facing cutters



В зависимости от характера и степени износа изменение сил может происходить в различных направлениях. Например, износ резцов по задней поверхности сопровождается увеличением силы резания. При преобладающем износе по передней поверхности сила резания может и снижаться.

Одним из отрицательных явлений при обработке титановых сплавов является явление адгезии, а в некоторых случаях происходит поверхностное упрочнение титановых сплавов, что способствует существенному затуплению режущего инструмента. Содержание углерода более чем 0,2% способствует образованию карбида титана (предел растворимости углерода в титановом сплаве составляет 0,2%); если содержание углерода в титановом сплаве превосходит это число, то образуются твердые карбиды титана, которые действуют на режущую кромку инструмента как абразив и затупляют ее.

Повышение обрабатываемости резанием осуществляется за счет оптимизации геометрии режущей части инструмента. Проведенный анализ зарубежной [11–17] и отечественной литературы [2–9] показал, что увеличение переднего угла приводит к

уменьшению сопротивления резания и прочности лезвия. Лезвие резца с отрицательным углом  $\gamma$  прочнее резца с положительным передним углом  $\gamma$ . С увеличением прочности обрабатываемого материала и снижением прочности инструментального материала передний угол необходимо уменьшать.

**Силы резания.** Величина силы резания, необходимая для преодоления сопротивления материалов при снятии стружки, зависит от ряда факторов: обрабатываемого материала, глубины резания, подачи, углов заточки резца, скорости резания ( $V$ ) и др. Схема сил резания при точении приведена на рис. 3.

Описывать процессы при точении при разных подачах будем по составляющей силе  $P_z$ , т.к. составляющая  $P_z$  действует в направлении  $V$  и называется «тангенциальной» силой резания. Поскольку она обычно лишь на 6–10% меньше полной силы резания  $R$ , то ее называют «усилием» резания.

**Режимы обработки.** Скорость резания была постоянной – 50 м/мин. Глубина резания  $t = 3$  мм. Менялась только подача  $S$ , значения которой составляли: 0,11; 0,15; 0,21 мм/об.

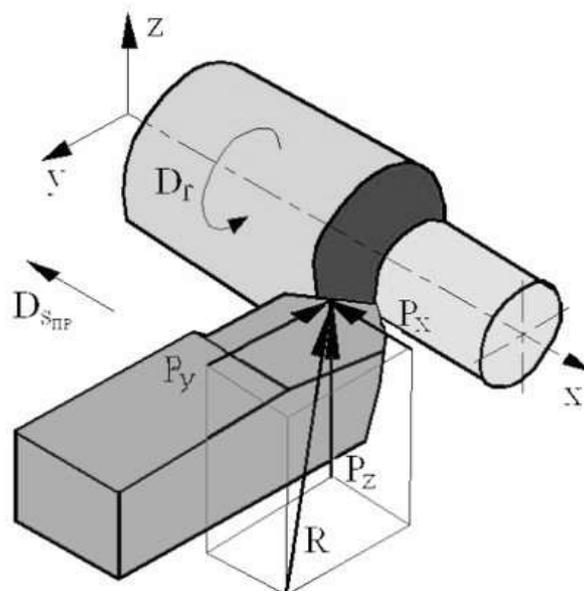


Рис. 3. Составляющие сил резания при токарной обработке  
Fig. 3. Components of cutting forces under turning

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные зависимости сил резания от переднего угла  $\gamma$  при различных значениях подачи приведены на рис. 4–6 [1].

Анализ зависимостей показывает, что при точении с подачей 0,11 мм/об (рис. 4), с увеличением  $\gamma$  до  $+10^\circ$ , сила резания

$P_z$  постепенно уменьшается. Ее значение изменяется от 1100 до 1000 Н (диапазон изменения составил всего 100 Н).

При точении с подачей  $S = 0,15$  мм/об (рис. 5) сила резания  $P_z$  изменилась, значение при переднем угле  $-8^\circ$  равно 1600 Н, и при увеличении переднего угла на значении  $+10^\circ$  она равна 1300 Н. Перепад значений равен 300 Н.

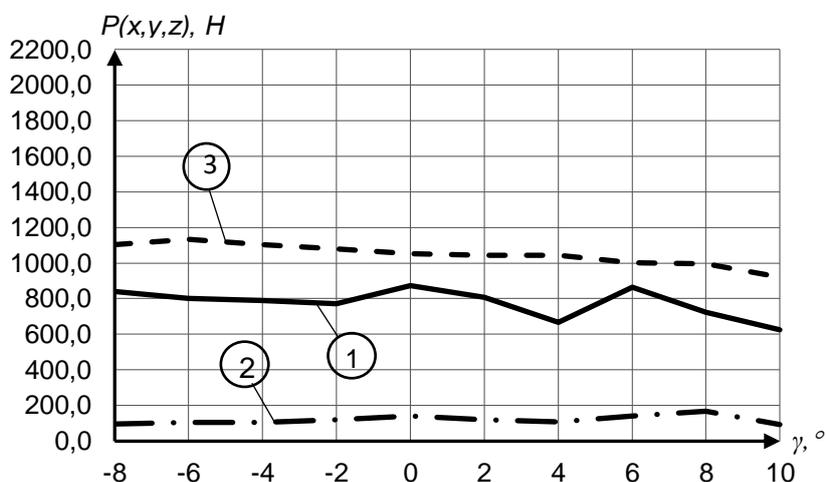


Рис. 4. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,11$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
Fig. 4. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.11$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)

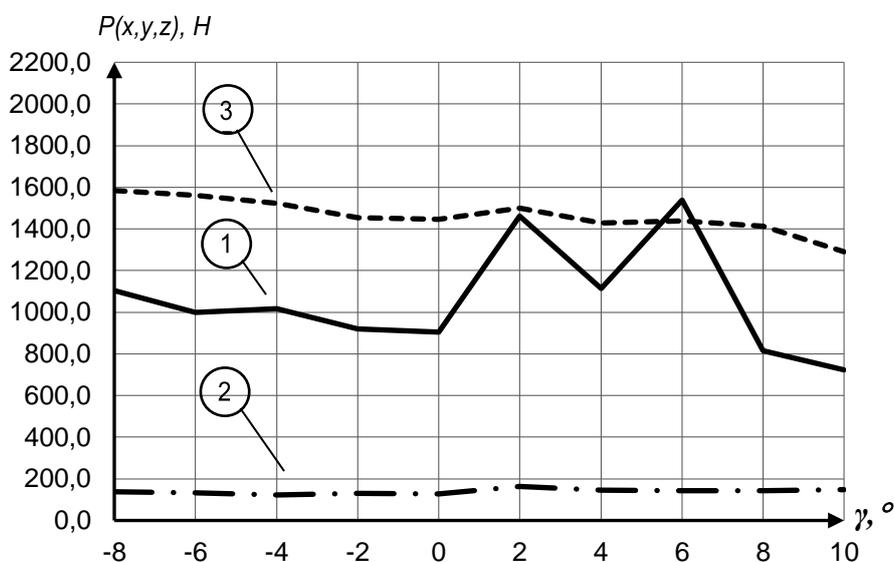


Рис. 5. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,15$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
Fig. 5. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.15$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)



Значение силы резания  $P_z$  при подаче  $S = 0,21$  мм/об (рис. 6) уже равно 2000 Н. В данном случае перепад сил от  $-8$  до  $+10^\circ$  составляет уже 400 Н.

Проведенный анализ по графикам с изменением подачи однозначно показывает, что с увеличением подачи значение силы  $P_z$  увеличивается, что подтверждает классические определения из теории резания [2–9]. При увеличении глубины резания и подачи растет площадь сечения срезаемого слоя, что вызывает возрастание всех составляющих силы резания. Но если рассматривать каждый график отдельно, то получается, что с увеличением переднего угла  $\gamma$  происходит уменьшение сопротивления резания, и, соответственно, силы резания уменьшаются [22, 25].

**Шероховатость.** После обработки заготовки проводились измерения шероховатости профилометром TR200. Построены графики, показывающие влияние режимов обработки на качество поверхности, с учетом изменения переднего угла  $\gamma$  (рис. 7). Согласно полученным графикам, можно сказать, что хорошее качество поверхности получается на протяжении всех передних углов только при подачах 0,11 и 0,21 мм/об. Значение параметра  $R_a$  колеблется между 8 и 9 классами чистоты поверхности, что соответствует по параметрам чистовому

точению и может быть использовано в производстве.

Значения шероховатости  $R_a$  при подаче 0,15 мм/об носят неоднозначный характер. Если рекомендовать режим обработки, при котором нужна качественная поверхность, то нужно выбирать передний угол  $\gamma$  со значениями  $-4, 0, +4, +8^\circ$ .

**Износ.** В процессе проведения эксперимента, после каждого прохода всеми резцами, измерялась длина площадки износа по передней и задней поверхностям с использованием измерительной машины Micro Vu-Sol-1. Износ рабочих поверхностей инструмента представляет собой сложный физико-механический процесс разрушения поверхностных слоев. Интенсивность износа зависит от скорости резания и подачи.

В процессе износа на многих фотографиях наблюдалось зональное выкрашивание режущей кромки. Это происходит потому, что частицы твердого сплава уносятся сходящей стружкой и имеют разные размеры. При точении с подачей  $S = 0,11$  мм/об, начиная со значения переднего угла от 0 до  $+10^\circ$ , происходило «выламывание» частиц кромки резца, что приводило к невозможности точения. Поэтому на графиках (рис. 8, 9) нет снятых значений износа у этих параметров угла.

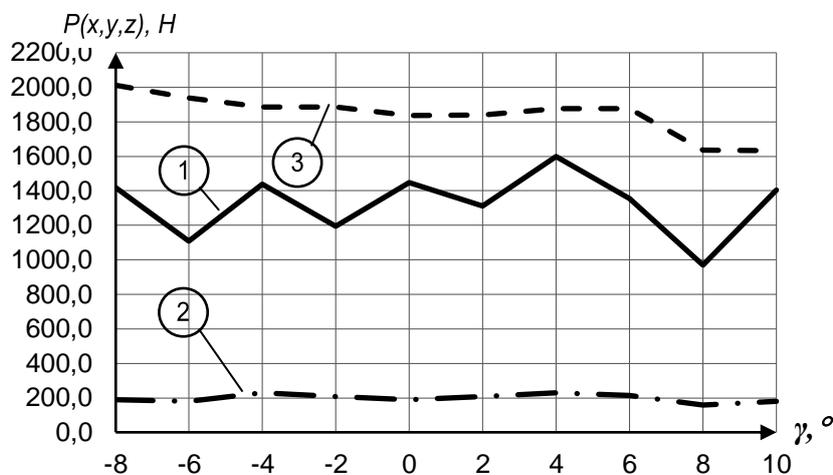
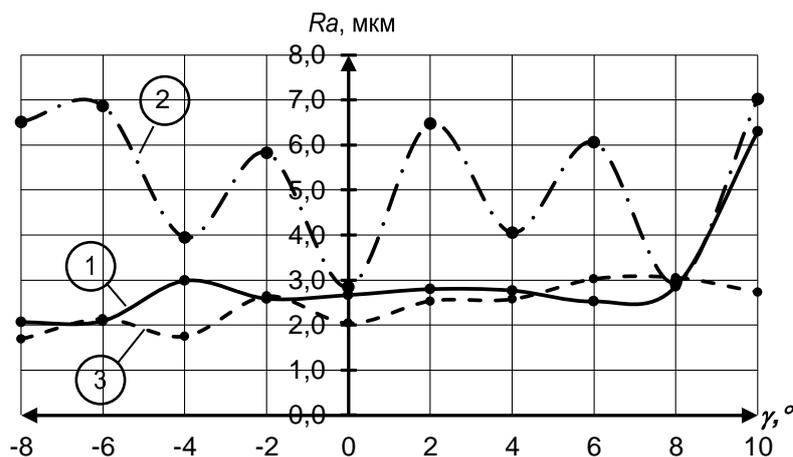


Рис. 6. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,21$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
Fig. 6. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.21$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)

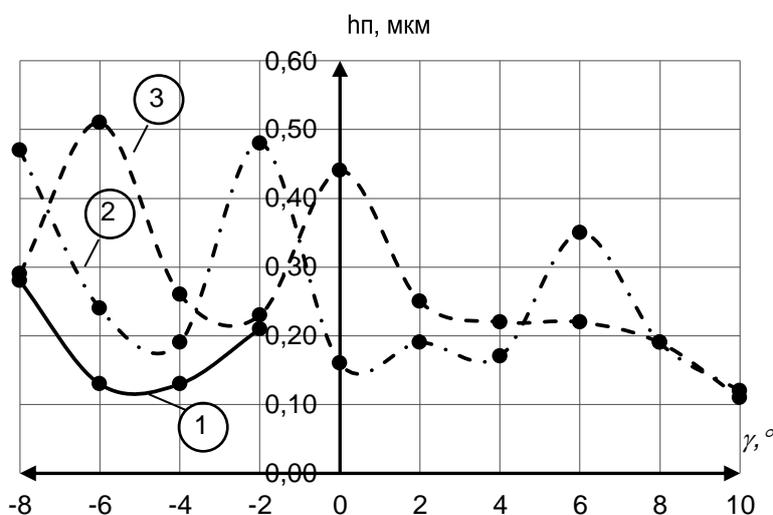


**Рис. 7. Полученные зависимости шероховатости  $R_a$  от изменения подачи  $S$  и переднего угла  $\gamma$ :  
кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об;  
Fig. 7. Obtained dependences of roughness  $R_a$  on the variations of the feed  $S$  and the front angle  $\gamma$ :  
curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; curve 3 –  $S = 0.21$  mm/rev**

Так как длина участков точения была одинаковая и составляла 10 мм, то время обработки зависело только от подачи, т.к. протекание износа во времени очень зависит от подачи и переднего угла как основных факторов, в данном случае  $V$  во внимание не берем [8, 9].

На рис. 8 представлены зависимости износа по передней поверхности  $h_p$ .

В целом можно отметить тенденцию всех кривых к уменьшению износа с увеличением переднего угла  $\gamma$ , если не заострять внимание на пиковых значениях в углах  $-6^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+6^\circ$ . Быстрее всего при этих значениях происходило наростообразование (которое сопровождается процессом точения титановых сплавов) и отрыв частиц рабочих поверхностей, как было объяснено выше.



**Рис. 8. Полученные зависимости износа по передней поверхности  $h_p$  от подачи  $S$   
кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об  
Fig. 8. Obtained dependences of the front surface  $h_p$  wear on the feed  $S$ :  
curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; curve 3 –  $S = 0.21$  mm/rev**

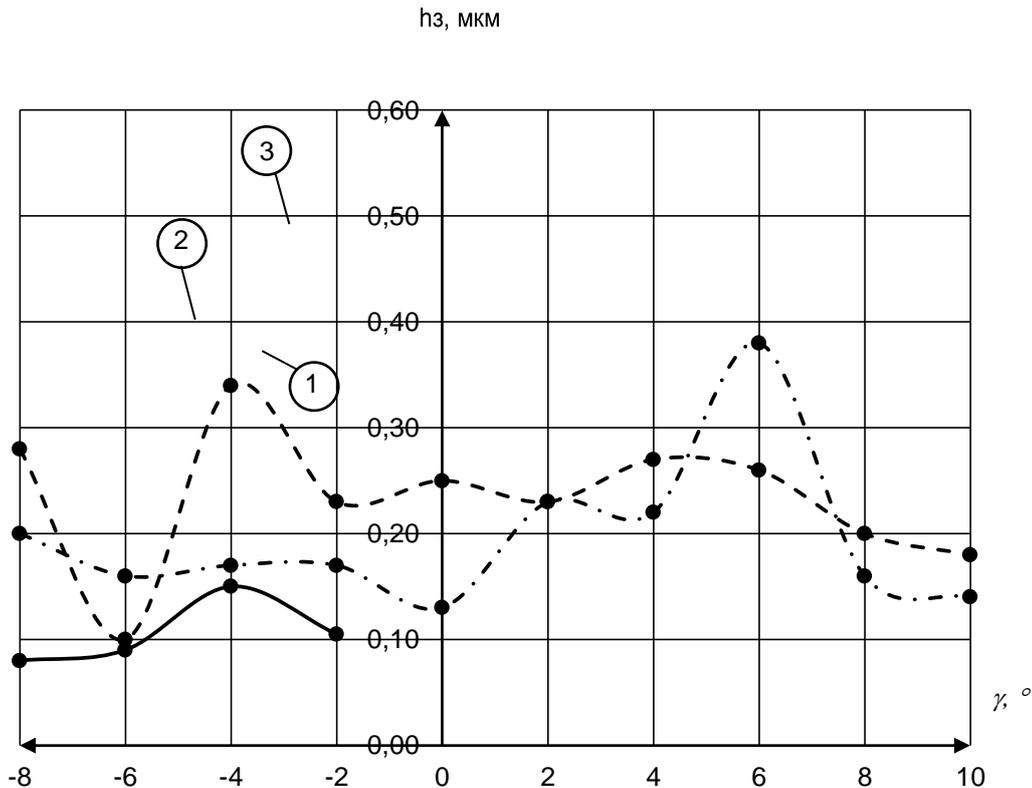


Рис. 9. Полученные зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  от подачи  $S$ :  
кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об  
Fig. 9. Obtained dependences of the back surface  $h_z$  wear on the feed  $S$ :  
curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; 3 curve –  $S = 0.21$  mm/rev

Изменение кривых износа по задней поверхности  $h_z$  (рис. 9) имеет более монотонный характер, по сравнению с износом по передней поверхности  $h_p$ , это вполне объяснимо. Привлекают внимание значения переднего угла  $\gamma$  равные  $-6^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $+6^\circ$ . В среднем все значения не попадают в зону «критического» износа, и инструмент можно считать работоспособным, кроме значения подачи  $S = 0,11$  мм/об.

Проведенные исследования характера износа твердосплавного инструмента при точении титанового сплава VT22 представляют значительный интерес для решения основного вопроса обрабатываемости резанием труднообрабатываемых материалов – определение стойкости и работоспособности режущего инструмента.

Проведенные исследования позволили уточнить представление о механизме износа по передней и задней граням инструмента.

Выявлено, что износ меняется в зависимости от параметров подачи  $S$  и значения переднего угла  $\gamma$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С увеличением переднего угла  $\gamma$  сила резания  $P_z$  уменьшается при всех подачах. Значение силы резания при подаче  $S = 0,11$  мм/об изменяется с 1100 Н до 1000 Н, при подаче  $S = 0,15$  мм/об диапазон изменения увеличивается с 1600 Н до 1300 Н, при подаче  $S = 0,21$  мм/об изменяется с 2000 Н до 1600 Н. Это свидетельствует о том, что при большей подаче прилагаются большие усилия резания. Оптимальный передний угол  $\gamma$  при всех подачах равен  $+10^\circ$ .

2. Согласно полученным графикам, можно сказать, что хорошее качество поверхности получается в диапазоне всех передних углов только при подачах 0,11 и

0,21 мм/об, кроме значения угла  $+10^\circ$ . Значение параметра  $Ra$  соответствует 8 и 9 классам чистоты поверхности.

3. В среднем все значения износа по задней поверхности  $h_z$  при подачах  $S = 0,15$  и  $0,21$  мм/об не попадают в зону «критического» износа, и инструмент можно считать работоспособным, кроме значения подачи  $S = 0,11$  мм/об, начиная с угла  $0^\circ$ . Привлекают внимание значения переднего угла  $\gamma$  равные  $-6^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $+6^\circ$ . Данное явление

можно объяснить внутренними процессами деформации в рабочей зоне либо появлением нароста. Износ по передней поверхности  $h_p$  имеет тенденцию к уменьшению с увеличением переднего угла  $\gamma$ . Это схоже с изменением силы резания  $P_z$  (п. 1), что позволяет предположить следующее: оптимальным передним углом  $\gamma$  в данных исследованиях является угол, который равен  $+10^\circ$ .

#### Библиографический список

1. Гурылев В.Б., Серебренникова А.Г. Подбор геометрии режущего инструмента при токарной обработке титанового сплава VT22 с целью анализа выходных параметров // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Комсомольск-на-Амуре, 8–12 апреля 2019 г). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2019. Т. 1. С. 66–69.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Ящерицын П.И., Ерёменко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания металлов и режущий инструмент. Изд. 2-е, перераб. и доп. Мн.: Высшая школа, 1981. 560 с.
4. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. К.: Техника, 1991. 152 с.
5. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1970. 184 с.
6. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1973. 496 с.
7. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием / пер. с англ. В.А. Пастунова. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
8. Куфарев Г.Л., Наумов В.А. Износ твердосплавного резца по задней грани и его влияние на силу резания // Известия Томского Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова. 1970. Т. 175. С. 147–153. [Электронный ресурс]. URL: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin\\_tpu-1970-v157-32\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin_tpu-1970-v157-32_bw.pdf) (15.06.2019).
9. Полетика М.Ф., Афонасов А.И. Характер износа твердосплавного инструмента при точении труднообрабатываемых сплавов титана // Известия Томского Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова. 1976. Т. 224. С. 144–147. [Электронный ресурс]. URL: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin\\_tpu-1976-v224-33\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin_tpu-1976-v224-33_bw.pdf) (15.06.2019).
10. Савичева Ю.М. Cutting tools wear // Студенческий научный форум: материалы XI Международной студенческой науч. конф. [Электронный ресурс]. URL: <http://scienceforum.ru/2019/article/2018015753>
11. Kovalev A., Yazhao Zhang, Hui Cao, Meng Yonggang. A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface // Frontiers in Mechanical Engineering. 2019. P. 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00031>
12. Karaguzela U., Bakkal M, Budak M. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation // Procedia CIRP. 2017. Vol. 58. P. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>
13. Balaji J.H., Vijayan K., Yogeswaraj 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. Jagadesh T., Samuel G.L. Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy Using Coated Carbide Tool // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 2450–2457. <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.496>
15. Chinesta F., Filice L., Micari F., Rizzuti S., Umbrello D. Assessments of Material Models Through Simple Machining Tests // International Journal of Material Forming. 2008. Issue 1. P. 507–510. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0171-4>
16. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and Numerical Study of Chip Formation During Straight Turning of Hardened AISI 4340 Steel // Journal Engineering Manufacture. 2005. Vol. 219. Issue 7. P. 515–524. <https://doi.org/10.1243/095440505X32445>
17. Krainev D.V., Polyanchikova M.Yu., Bondarev A.A. Influence of the surface layer characteristics of the regularities of the cutting process // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 3. <http://doi.org/10.1051/mateccconf/201712901045>
18. Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е. Наноструктурные процессы при разрушении и изнашивании твердосплавного режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015.



№ 7. С. 59–66.

19. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и Вейвлет анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2013. № 5. С. 183–189. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-iznosa-rezhushchego-instrumenta-na-osnove-fraktalnogo-i-veyvlet-analiza-s-ispolzovaniem-iskusstvennogo-intellekta-v-rezhime-vremeni-s-vozmozhnostyu-udalennogo-dostupa> (03.06.2019).
20. Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 184 с.
21. Отений Я.Н., Мартыненко О.В. Исследование особенностей процесса обработки резанием цилиндрических поверхностей деталей машин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9-3. С. 452–456. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7346> (03.06.2019).
22. Ким В.А., Якубов Ч.Ф. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при реза-

- нии металлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 35–45.  
<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-35-45>
23. Savilov A.V., Svinin V.M., Timofeev S.A. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning // International Conference Information Technologies in Business and Industry: IOP Conference Series. 2018. Vol. 1015. Issue 4. P. 042055. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042055/pdf> (03.06.2019). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042055>
24. Савилов А.В., Никулин Д.С., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твердых сплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 6. С. 26–33.
25. 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: IOP Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 012104. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104> (03.06.2019). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

#### References

1. Gurylev VB, Serebrennikova AG. Selection of Cutting Tool Geometry when Turning Titanium Alloy VT22 in Order to Analyze Output Parameters. In: *Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy: materialy II vserossiyskoy nationalnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* = Youth and Science: Topical Problems of Fundamental and Applied Research; Proceedings of II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. (8–12 April 2019, Komsomolsk-na-Amure). Komsomolsk-na-Amure: Komsomolsk-na-Amure State University; 2019, vol. 1, p. 66–69. (In Russ.)
2. Bobrov VF. *Fundamentals of the Metal Cutting Theory*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.)
3. Yascheritsyn PI, Eryomenko ML, Zhigalko NI. *Fundamentals of Metal Cutting and Cutting Tools*. Minsk: Vyscheyshaya shkola; 1981, 560 p. (In Russ.)
4. Ostafiev VA, Antonuk VC, Tymchik GS. *Diagnostics of Metalworking Process*. Kiev: Tehnik; 1991, 152 p. (In Russ.)
5. Krivoukhov VA, Chubarov AD. *Cutting of Titanium Alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 1970, 184 p. (In Russ.)
6. Woolf AM. *Cutting of Metals*. Leningrad: Mashinostroenie; 1973, 496 p. (In Russ.)
7. Armarego IJA, Brown RH. *The Machining of Metals*, 1977, 325 p. (Russ. ed.: *Obrabotka metallov rezaniem*. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 325 p.)
8. Kufarev GL, Naumov VA. Back-edge Wear of Hard-Alloy Cutter and its Effect on the Cutting Force. *Izvestiya Tomskogo Ordena Oktjabrskoy Revolyutsii i Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni politehnicheskogo instituta*. 1970;175:147–153. Available from: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin\\_tpu-1970-v157-32\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin_tpu-1970-v157-32_bw.pdf) [Accessed 15th June 2019]. (In Russ.)
9. Poletika MF, Afonov AI. The Nature of Carbide Tool Wear when Turning Hard-to-Work Titanium Alloys. *Izvestiya Tomskogo Ordena Oktjabrskoy Revolyutsii i Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni politehnicheskogo instituta*. 1976;224:144–147. Available from: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin\\_tpu-1976-v224-33\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin_tpu-1976-v224-33_bw.pdf) [Accessed 15th June 2019]. (In Russ.)
10. Savicheva YuM. Cutting Tools Wear. In: *Studencheskij nauchnyj forum: materialy XI Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii* = Student Science Forum: Proceedings of XI International Student Scientific Conference. Available from: <http://scienceforum.ru/2019/article/2018015753> [Accessed 15th June 2019].
11. Kovalev A, Yazhao Zhang, Hui Cao, Meng Yonggang. A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019:1–11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00031>
12. Karaguzela U, Bakkal M, Budak M. Mechanical and

Thermal Modeling of Orthogonal Turn-Milling Operation. *Procedia CIRP*. 2017;58:287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>

13. Balaji JH, Vijayan K, Yogeswaraj 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. Jagadesh T, Samuel GL. Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy using Coated Carbide Tool. *Procedia Materials Science*. 2014;5:2450–2457. <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.496>

15. Chinesta F, Filice L, Micari F, Rizzuti S, Umbrello D. Assessments of Material Models through Simple Machining Tests. *International Journal of Material Forming*. 2008;1:507–510. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0171-4>

16. Belhadi S, Mabrouki T, Rigal J-F, Boulanouar L. Experimental and Numerical Study of Chip Formation During Straight Turning of Hardened AISI 4340 Steel. *Journal Engineering Manufacture*. 2005;219(7):515–524. <https://doi.org/10.1243/095440505X32445>

17. Krainev DV, Polyanchikova MYu, Bondarev AA. Influence of the Surface Layer Characteristics of the Regularities of the Cutting Process. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 129, p. 3. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>

18. Kabaldin YG, Vlasov EE. Nanostructured Processes at the Destruction and Wear of Carbide Cutting Tools. *Izvestiya vysschih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* = BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2015;7:59–66. (In Russ.)

19. Kabaldin YuG, Laptev IL, Shatagin DA, Zotov VO, Seryj SV. Diagnosis Tool Wear based on the Fractal and Wavelet Analysis using Artificial Intelligence in Real Time with Remote Access Capabilities. *Trudy Nizhegorodskogo tehničeskogo universiteta imeni RE Alekseeva* = Proceedings of Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alekseev. 2013;5:183–189. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-iznosa->

#### **Критерии авторства**

Серебренникова А.Г., Гурылев В.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

rezhuschego-instrumenta-na-osnove-fraktalnogo-i-vevlet-analiza-s-ispol-zlvaniem-iskusstvennogo-intellekta-v-rezhime/viewer [Accessed 3rd June 2019]. (In Russ.)

20. Kabaldin IuG, Kretinin OV, Shatagin DA, Kuz'mishina AM. *Improving Machining Efficiency based on Artificial Intelligence Approaches and Nonlinear Dynamics*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie; 2018, 184 p. (In Russ.)

21. Oteniy YaN, Martynenko OV. Studying features of cutting of machine cylindrical surfaces. *International Journal of Applied and Fundamental Research Development*. 2015;9-3:452–456. Available from: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7346> [Accessed 3rd June 2019].

22. Kim VA, Yakubov CF. Dissipative Structure of Contact-Friction Interaction at Metal Cutting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(12):35–45. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-35-45>

23. Savilov AV, Svinin VM, Timofeev SA. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning. In: *International Conference Information Technologies in Business and Industry: IOP Conference Series*. 2018;1015(4):042055. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042055/pdf> [Accessed 3rd June 2019]. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042055>

24. Savilov AV, Nikulin DS, Nikolaeva EP, Rodygina AE. Current State of Manufacturing High Performance Cutting Tools from Powdered Metal High-Speed Steels and Hard Alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;6:26–33. (In Russ.)

25. 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: IOP Conference Series*. 2018;944:012104. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104> [Accessed 3rd June 2019]. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

#### **Authorship criteria**

Serebrennikova A.G., Gurylyov V.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Серебrenникова Анжела Геннадьевна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Машиностроение»,  
Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Россия;  
e-mail: Anzhela03121967@yandex.ru

**Гурылев Владимир Борисович,**  
магистрант,  
Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Россия;  
✉ e-mail: vova.96-79@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anzhela G. Serebrennikova,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
Associate Professor of the Department  
of Mechanical Engineering  
Komsomolsk-na-Amure State University,  
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013,  
Russia;  
e-mail: anzhela03121967@yandex.ru

**Vladimir B. Gurylyov,**  
Master Degree Student,  
Komsomolsk-na-Amure State University,  
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013,  
Russia;  
✉ e-mail: vova.96-79@mail.ru