

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-470-476>

УДК 621.9.02

## Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения

Кандидаты техн. наук, доценты А. И. Пронин<sup>1)</sup>, В. В. Мыльников<sup>2)</sup>,  
студенты Д. А. Валько<sup>1)</sup>, А. С. Севрюков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Одним из видов финишных операций механической обработки поверхности изделий из металлических материалов является твердое точение, которое осуществляется на повышенных режимах токарной обработки. При обработке сталей, закаленных на высокую твердость, на режимах обработки с проявлением всех особенностей, характеризующих твердое точение, выделяется много теплоты, которая в процессе токарной обработки переходит в стружку. При этом значения силы резания уменьшаются, что связано с разупрочнением активных поверхностных слоев обрабатываемого материала и его последующей пластификацией. Это приводит к уменьшению сил резания в зоне контакта. Существенный интерес как с научной, так и с практической точек зрения вызывает вопрос изменения температуры резания и параметров обработки на режимах твердого точения. В статье представлены экспериментальные результаты исследований и эмпирические зависимости радиальной составляющей силы и температуры резания от скорости резания и подачи на оборот при фиксированной глубине резания на режимах твердого точения закаленной стали. Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка и стенда для регистрации, контроля и анализа динамических процессов (в виде сигнала от резца) при проведении токарной обработки. В качестве испытуемого инструмента использовали резец со сменными режущими пластинами из керамики, а материалом заготовок для проведения исследований была сталь ХВГ, подвергнутая термической обработке на категорию твердости 55 HRC. Произведена компьютерная и математическая обработка методом наименьших квадратов полученных результатов, которая позволила вывести расчетные формулы для определения значений исследуемых факторов. Определены оптимальные значения факторов, соответствующие минимальному значению радиальной составляющей силы и температуре резания.

**Ключевые слова:** резец, твердое точение, сила резания, скорость резания, температура резания, подача резания, режущая керамика, закаленная сталь

**Для цитирования:** Исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения / А. И. Пронин [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 470–476. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-470-476>

## Investigation of the Dynamics of Processing Parameters in Hard Turning Modes

A. I. Pronin<sup>1)</sup>, V. V. Mylnikov<sup>2)</sup>, D. A. Valko<sup>1)</sup>, A. S. Sevryukov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Komsomolsk-on-Amur State University (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

**Abstract.** One of the types of finishing operations of machining the surface of products made of metal materials is hard turning, which is carried out at elevated turning modes. When processing steels hardened to high hardness, in processing modes with the manifestation of all the features characterizing hard turning, a lot of heat is released, which turns into chips during turning, while the values of the cutting force decrease, which is associated with the softening of the active surface

### Адрес для переписки

Пронин Александр Иннокентьевич  
Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
пр. Ленина, 27,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация  
Тел.: +7 4217 24-11-35  
mdsov@knastu.ru

### Address for correspondence

Pronin Alexander I.  
Komsomolsk-on-Amur State University  
27, Lenina Ave.,  
681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation  
Тел.: +7 4217 24-11-35  
mdsov@knastu.ru

layers of the processed material and its subsequent plasticization, which leads to a decrease in cutting forces in the contact zone. A significant interest both from a scientific and practical point of view is the issue of changing the cutting temperature and processing parameters in hard turning modes. The paper presents experimental research results and empirical dependences of the radial component of the cutting force and temperature on cutting speed and feed per revolution, at a fixed cutting depth in the modes of hard turning of hardened steel. The research has been carried out on an experimental installation specially designed for this purpose, consisting of a lathe and a stand for recording, monitoring and analyzing dynamic processes (in the form of a signal from the cutter) during turning. A cutter with replaceable ceramic cutting plates was used as a test tool, and the material of the workpieces for the research was HVG steel, subjected to heat treatment for a hardness category of 55 HRC. Computer and mathematical processing of the results obtained using the least squares method was carried out, which allowed us to derive calculation formulas for determining the values of the studied factors. The optimal values of the factors corresponding to the minimum value of the radial component of the force and the cutting temperature are determined.

**Keywords:** cutter, hard turning, cutting force, cutting speed, cutting temperature, cutting feed, cutting ceramics, hardened steel

**For citation:** Pronin A. I., Mylnikov V. V., Valko D. A., Sevryukov A. S. (2023) Investigation of the Dynamics of Processing Parameters in Hard Turning Modes. *Science and Technique*. 22 (6). 470–476. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-470-476> (in Russian)

## Введение

Наилучшая результативность механической обработки деталей машин и изделий с достижением минимальной себестоимости и максимального экономического эффекта на производстве может быть получена лишь при условии оптимальных соотношений технологического процесса в конкретно заданных условиях обработки [1–5]. Выбор предпочтительных параметров и выявление диапазонов их значений с результативными комплексными показателями эффективности механической обработки материалов является одной из приоритетных задач решения параметрической оптимизации технологических процессов. Особая актуальность таких задач выходит на передний план при оптимизации параметров новых технологических процессов на финишных особо ответственных операциях обработки тяжело обрабатываемых сплавов (например, закаленных и нержавеющей сталей) и современных малоизученных материалов нового поколения [6–10].

К одному из видов финишных операций механической обработки поверхности изделий из металлических материалов можно отнести твердое точение. Твердое точение осуществляется на повышенных режимах токарной обработки. При обработке сталей, закаленных на высокую твердость, на режимах обработки с проявлением всех особенностей, характеризующих твердое точение, выделяется много теплоты, которая в процессе токарной обработки переходит в стружку. При этом значения

силы резания уменьшаются, что связано с разупрочнением активных поверхностных слоев обрабатываемого материала и его последующей пластификацией. Это приводит к уменьшению сил резания в зоне контакта. Процесс пластического деформирования поверхности материала обрабатываемой заготовки при твердом точении проходит с высокой скоростью, где наблюдается адиабатический разогрев в зоне резания. При этом максимум теплового потока переходит в стружки, вследствие этого по температуре стружки можно оценивать температуру резания.

В проведенных нами исследованиях, которые опубликованы в работах [11–12], были экспериментально определены режимы твердого точения, на которых обрабатывающий инструмент показал приемлемую по длительности работы стойкость при обеспечении шероховатости, соответствующей чистому шлифованию, при обработке снаружи цилиндрических деталей. В работе [11] определены силы резания на режимах обработки, характеризующих твердое точение, и выявлены наиболее оптимальные режимы. Однако существенный интерес с точки зрения как научной составляющей, так и практической вызывает вопрос изменения температуры резания и динамики изменений параметров обработки на режимах твердого точения.

Решением задач определения оптимальных параметров при токарной обработке занимается большое количество научных коллективов, но обычно исследования не проводят в областях обработки на режимах, характеризующих твер-

дое точение. Например, в [13] исследования выполнены для обычных скоростей. Обработка полученных результатов позволила связать константу температуры резания с некоторыми точками, определяющими минимальную относительную интенсивность изнашивания. Поэтому представляется актуальным исследование динамики параметров обработки на режимах твердого точения.

Цель работы – экспериментально определить особенности динамики изменения силы и температуры резания и выявить значения этих параметров соответствующим режимам, при которых наблюдаются признаки твердого точения.

### Выбор факторов эксперимента

Предварительный анализ режимов токарной обработки позволил определить наиболее значимые факторы, оказывающие существенное влияние на силу и температуру резания, тем самым значительно сократить временные затраты в реализации поставленной в данной работе цели. В общем случае на исследуемые параметры оказывают влияние следующие группы факторов:

- 1) геометрические размеры применяемых режущих пластин;
- 2) износ режущего инструмента;
- 3) основные параметры режимов токарной обработки;
- 4) твердость материала, по которому производили процесс резания.

В исследовании для решения задач, поставленных в данной работе:

1) использовали пластины, массово производимые в соответствии с ГОСТ заводом-изготовителем, где геометрические размеры являются стандартизированными, т.е. на результаты в данном исследовании влияния не оказывают;

2) износ тоже принят постоянным, так как испытания проводили на режимах твердого точения, которые относятся к чистовой обработке резанием, призванной заменить шлифование, характеризуемой минимальным срезом обрабатываемого высокотвердого материала на больших скоростях резания. Кроме того, в настоящем исследовании для полного исключения влияния износа на динамику изменения силы и температуры резания в процессе твердого то-

чения до минимума сокращено время контакта режущей поверхности пластины с поверхностью заготовки;

3) исходя из опыта ранее выполненных работ в качестве контролируемых параметров выбраны скорости подачи и резания при фиксированной глубине резания;

4) заготовки, по которым проводили точение, поставлялись после термической обработки на высокую твердость, контроль которой показал допустимый разброс значений, в итоге была принята твердость как постоянный фактор, не влияющий на результаты данного исследования.

С целью обеспечения необходимой идентичности условий и достоверности получаемых результатов измерение значений исследуемых факторов производили на одинаковых диаметрах заготовок.

### Методика проведения исследования

Исследования проводили на специально сконструированной для этих целей экспериментальной установке, состоящей из токарного станка марки 16К20Ф3С32 и станда STD.201-2 для регистрации, контроля и анализа динамических процессов (в виде сигнала от резца), при проведении токарной обработки. Динамометр, смонтированный в конструкции данного станда, служит для замера составляющих силы резания ( $F_x$  – осевая;  $F_y$  – радиальная;  $F_z$  – тангенциальная) и имеет измерительный преобразователь, передающий сигналы динамических нагрузок на блок управления. Данный блок используется в качестве платы сбора данных электросигналов с датчиков STD 201-2 и формирует в high-speed USB 2.0 с последующей передачей на порт USB ПЭВМ.

В качестве испытуемого инструмента использовали резец со сменными режущими пластинами, имеющими следующие размеры:  $\gamma = -8^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\lambda = 5^\circ$ , сечение державки резца 20×20 мм.

Материалом исследуемых пластин являлась режущая керамика ВОК-60, в составе которой 70 %  $Al_2O_3$  + 30 % TiC по ГОСТ 25003–81 ( $l = 16,5$  мм;  $s = 4,76$  мм;  $r = 0,8$  мм; теплопроводность  $\lambda_p = 35,0$  Вт/(м·°С)).

В качестве материала заготовок для проведения исследований была использована

сталь ХВГ, подвергнутая термической обработке на категорию твердости 55 HRC в соответствии с ГОСТ 4543–71 ( $D = 110$  мм;  $L = 350$  мм). Инструмент из данной низколегированной стали используется для производства и контроля точности размеров деталей и узлов машин, где недопустимы даже малейшие потери изначальной формы при закалке во время термической обработки (например, коробление).

Интервалы скоростей подачи и резания для обработки заготовки из стали ХВГ выбраны на основе экспериментальных результатов в ходе работ по твердой обработке сталей, закаленных на высокую твердость [1–3].

Последовательность этапов эксперимента следующая:

1) заготовку устанавливали и зажимали в патроне станка 16К20Ф3С32;

2) перед каждым экспериментом заменяли режущую кромку пластины с целью снижения влияния ее износа на экспериментальные значения;

3) проводили измерения силы и температуры резания, для этого использовали динамометр и пирометр Testo 835-T2.

### Результаты экспериментов

Результаты исследования, представленные в работах [5–8], позволили установить, что изменение режимов резания наибольшее влияние оказывает на радиальную составляющую силы резания. Поэтому в представленной работе исследовали динамику изменения радиальной составляющей силы резания  $F_y$  в связи с температурой резания  $T$ . Проводили четыре серии экспериментов с фиксированной глубиной резания и с увеличением скорости на 60 м/мин при заданной скорости подачи, определяли при этом значения силы  $F_y$  и температуры  $T$ . В каждой серии было по четыре этапа исследований с одинаковым приращением на пяти скоростях резания.

Экспериментально полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты эксперимента

#### Results of the experiment

Номер серии эксперимента	Режимы резания			Результаты эксперимента	
	Глубина резания $t$ , мм	Скорость подачи $S$ , мм/об	Скорость резания $v$ , м/мин	Радиальная составляющая силы резания $F_y$ , Н	Температура $T$ , °С
1	0,2	0,07	320	136	980
			380	115	1010
			440	102	1041
			500	105	1068
			560	141	1092
2	0,2	0,14	320	167	1061
			380	142	1099
			440	125	1131
			500	138	1160
			560	158	1187
3	0,2	0,21	320	238	1114
			380	187	1153
			440	178	1188
			500	184	1218
			560	213	1261
4	0,2	0,28	320	279	1153
			380	228	1194
			440	185	1229
			500	225	1261
			560	276	1265

При проведении первой серии исследований с минимальной подачей, составляющей 0,07 об/мин, с увеличением скорости резания с приростом на одинаковое значение, составляющее 60 м/мин на каждом этапе эксперимента, наблюдали немонотонное изменение как температуры, так и силы  $F_y$ . Повышение скорости с 320 до 380 м/мин приводит к самому большому росту температуры из всех проведенных этапов исследований, при этом наблюдали резкое снижение значения силы  $F_y$ , составившей минус 21 Н.

Увеличение скорости до 440 м/мин приводит к последующему снижению силы  $F_y$  до 102 Н с продолжающимся ростом температуры. Необходимо отметить, что на данном этапе зафиксированы минимальное значение силы  $F_y$  и минимальное изменение температуры в абсолютном приращении.

Дальнейшее повышение скорости с 440 до 500 м/мин показывает кардинальный поворот в динамике изменения силы  $F_y$  – наблюдается экстремум на этом этапе исследования, характер изменения демонстрирует последующий прирост значений силы  $F_y$  до 105 Н, при этом продолжает расти температура до 1068 °С.

При максимальной скорости проводимых исследований (560 м/мин) зафиксированы максимальные значения силы  $F_y$  и температуры  $T$ . При этом зафиксирован достаточно резкий скачок в росте силы  $F_y$ .

Во второй серии экспериментов с увеличенной скоростью подачи до 0,14 об/мин наблюдается самое большое значение силы  $F_y$  при минимальной скорости резания и минимальная температура из всего скоростного диапазона этой серии экспериментов. В дальнейшем снижение силы  $F_y$  до скорости 440 м/мин и последующее повышение происходят без каких-либо скачков и выпадов. Прирост температуры на каждом скоростном этапе исследования монотонно незначительно снижается при общем ее увеличении. Так, повышение скорости испытания с 320 до 380 м/мин привело к возрастанию температуры на 38 °С, а на высокоскоростном этапе испытания с 500 до 560 м/мин только на 27 °С.

При испытаниях в третьей экспериментальной серии скорость подачи составляла 0,21 об/мин. При самой низкой скорости испытания получи-

ли очень высокие значения силы  $F_y$ . Увеличение скорости на 60 м/мин (до 380 м/мин) привело к резкому снижению силы  $F_y$ , но при этом наблюдали увеличенный прирост температуры в сравнении с приростом на следующих этапах испытаний данной серии эксперимента.

В скоростном диапазоне 380–500 м/мин наблюдаются стабилизация изменений значений силы резания  $F_y$  с размахом в 10 Н и стабильное повышение температуры порядка 30 °С за каждые 60 м/мин роста скорости.

Дальнейшее увеличение скорости резания до 560 м/мин приводит к ускоренному возрастанию и температуры  $T$ , и радиальной составляющей силы резания  $F_y$ .

Четвертая серия экспериментов показала самую стабильную динамику изменений исследуемых факторов при изменении скорости резания в заданном диапазоне и максимальной скорости подачи проведенных опытов. На каждом этапе увеличения скорости на 60 м/мин наблюдали равномерное снижение силы  $F_y$  до минимума (185 Н) при 440 м/мин, а затем равномерный рост, причем увеличение скорости на последнем этапе до максимума привело к росту значения силы  $F_y$  на 51 Н, что полностью совпало со значением, только противоположным по знаку, при уменьшении данной силы в диапазоне скоростей с 320 до 380 м/мин.

Рост температуры  $T$  на протяжении всей четвертой серии экспериментов проходил равномерно в среднем чуть более 30 °С за каждое возрастание скорости на 60 м/мин.

### Обработка экспериментальных результатов

Полученные результаты (табл. 1) подвергли компьютерной обработке, для этого применили программу Microsoft Office Excel, в которой выполнили графическое построение полученных зависимостей силы  $F_y$  и температуры  $T$ , представленных на рис. 1 и 2.

На рис. 1 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости  $T$  и силы  $F_y$  от  $S$ . Видно, что с увеличением  $S$  возрастает  $F_y$  и, следовательно, количество выделяющейся теплоты. При  $v = 440$  м/мин наблюдается самое минимальное увеличение  $F_y$ , значение  $T$  продолжает возрастать. Сила  $F_y$  растет медленнее по сравнению с ростом подачи, вследствие

чего прирост теплоты отстает от роста подачи. С увеличением  $S$  температура  $T$  изменяется незначительно.

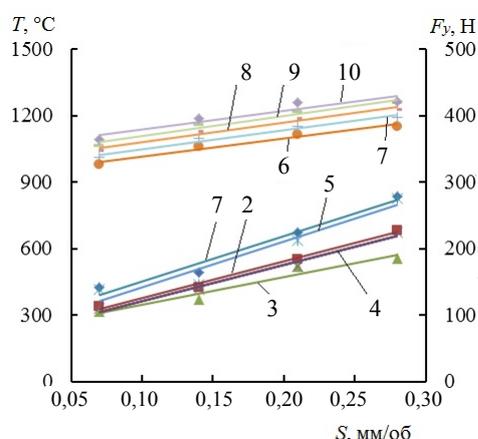


Рис. 1. Зависимости  $T$  и  $F_y$  от  $S$ : 1, 6 –  $v = 320$  м/мин; 2, 7 – 380; 3, 8 – 440; 4, 9 – 500; 5, 10 – 560 м/мин

Fig. 1. Dependences of  $T$  and  $F_y$  on  $S$ : 1, 6 –  $v = 320$  m/min; 2, 7 – 380; 3, 8 – 440; 4, 9 – 500; 5, 10 – 560 m/min

На рис. 2 изображены полученные в ходе экспериментов зависимости  $T$  и  $F_y$  от  $v$  (рис. 2).

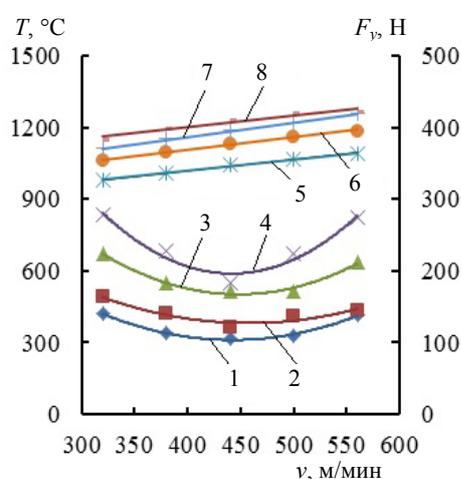


Рис. 2. Зависимости  $T$  и  $F_y$  от  $v$  резания: 1, 5 –  $S = 0,07$  мм/об; 2, 6 – 0,14; 3, 7 – 0,21; 4, 8 – 0,28 мм/об

Fig. 2. Dependences of  $T$  and  $F_y$  on cutting  $v$ : 1, 5 –  $S = 0.07$  mm/rev; 2, 6 – 0,14; 3, 7 – 0,21; 4, 8 – 0,28 mm/rev

Из полученных зависимостей видно, что с увеличением  $v$  в диапазоне от 320 до 440 м/мин  $F_y$  уменьшается и, следовательно, снижается мощность резания. Затем наблюдается рост  $F_y$ , из чего следует увеличение мощности резания.

С повышением  $v$  возрастает количество выделяющейся теплоты, которая в основном уносится стружкой и немного резцом. Унос теплоты стружкой тоже возрастает с увеличением  $v$ , поэтому не наблюдается линейной зависимости  $T$  от  $v$ .

На основе полученных результатов экспериментальных данных и построенных графиков производили их математическую обработку, используя метод наименьших квадратов. Это позволило вывести расчетные формулы для определения значений исследуемых факторов, которые для простоты восприятия оформили в виде соответствующих табл. 2, 3.

Таблица 2

Расчетные формулы для определения  $T$  и  $F_y$   
Calculation formulas for determining  $T$  and  $F_y$

Режим резания		Формула для определения $T$ , °C	Формула для определения $F_y$ , Н
$t$ , мм	$v$ , м/мин		
0,2	320	$T = 817S + 734$	$F_y = 667S + 84$
	380	$T = 865S + 963$	$F_y = 553S + 70$
	440	$T = 887S + 992$	$F_y = 414S + 74$
	500	$T = 910S + 1018$	$F_y = 543S + 67$
	560	$T = 847S + 1053$	$F_y = 687S + 73$

Таблица 3

Расчетные формулы для определения  $T$  и  $F_y$   
Calculation formulas for determining  $T$  and  $F_y$

Режим резания		Формула для определения $T$ , °C	Формула для определения $F_y$ , Н
$t$ , мм	$S$ , мм/об		
0,2	0,07	$T = 0,48v + 828$	$F_y = 0,0024v^2 - 2,16v + 581$
	0,14	$T = 0,53v + 893$	$F_y = 0,002v^2 - 1,74v + 526$
	0,21	$T = 0,6v + 921$	$F_y = 0,003v^2 - 3,08v + 856$
	0,28	$T = 0,49v + 1004$	$F_y = 0,006v^2 - 5,04v + 1310$

## ВЫВОДЫ

1. С увеличением скорости подачи при фиксированной глубине резания наблюдается возрастание температуры, при этом наименьший ее прирост за каждый этап увеличения скорости резания на 60 м/мин происходит в сериях экспериментов с малыми скоростями подачи.

2. Минимальные значения силы  $F_y$  при всех исследованных скоростях подачи получили при скорости резания 440 м/мин на каждой серии эксперимента, которые графически показаны в виде экстремумов.

3. Результаты испытаний показали снижение величины силы  $F_y$  во всех четырех сериях проведенных экспериментов в диапазоне скоростей резания с 320 до 440 м/мин, а с 440 до 560 м/мин – ее увеличение. При этом установлено, что испытания при  $S = 0,21$  в третьей серии экспериментов выявили протяженный скоростной диапазон резания (380–500 м/мин), на котором сила  $F_y$  изменяется незначительно (в пределах 5 %).

4. Получена зависимости  $F_y$  и  $T$  от параметров обработки на режимах твердого точения, и выявлена динамика их изменения, что позволило определить значения скорости подачи и резания, обеспечивающие минимальное значение  $F_y$  и соответствующую ему  $T$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- Stephenson, D. A. *Metal Cutting Theory and Practice* / D. A. Stephenson, J. S. Agapiou. CRC Press, 2018. 864 p. <https://doi.org/10.1201/9781315373119>.
- Ashley, S. High – Speed Machining Goes Mainstream / S. Ashley // *Mechanical Engineering*. 1995. Vol. 117, No 5. P. 56–61.
- Боровский, Г. В. Современные технологии обработки материалов / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов. М.: Машиностроение, 2015. 304 с.
- Plaza, M. The prons and cons of High-Speed Machining / M. Plaza // *Canadian Machinery and Metalworking*. Sep. 1995. P. 8–10.
- Schulz, H. High – Speed Machining / H. Schulz, T. Moriwaki // *CIRP Annals*. 1992. T. 41, No 2. P. 637–642. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63250-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63250-8).
- Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 149 с.
- Плотников, А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. Волгоград: РПК «Политехник», 2003. 184 с.
- Plasty, J. High – Speed Machining / J. Plasty // *CIRP Annals*. 1993. T. 42, No 2. P. 733–738. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62536-0](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62536-0).
- Енек, М. Влияние состава покрытия инструментальных пластин методом PVD на шероховатость поверхности при точении / М. Енек, В. И. Серебряков, Л. Э. Шварцбург // *Технология машиностроения*. 2010. № 8. С. 25–28.
- Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. М.: Высш. шк., 1974. 587 с.
- Pronin, A. I. Application of Orthogonal Central Composition Planning of Experiments to Optimize the Turning of KHVG-Hardened Steel by Cutting Ceramics / A. I. Pro-

- min, V. V. Myl'nikov, A. D. Romanov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47, No 1. P. 112–120. <https://doi.org/10.3103/s1052618818010132>.
- Pronin, A. I. Исследование температуры резания при токарной обработке закаленных сталей, применяемых для изготовления деталей морских судов / А. И. Пронин, В. В. Мылников, Д. А. Валько, И. С. Синецын // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. Т. 2, No 2. С. 42–46. <https://doi.org/10.37220/mit.2021.52.2.050>.
- Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

Поступила 15.04.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

#### ЛИТЕРАТУРА

- Stephenson D. A., Agapiou J. S. (2018) *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press. 864. <https://doi.org/10.1201/9781315373119>.
- Ashley S. (1995) High – Speed Machining Goes Mainstream. *Mechanical Engineering*, 117 (5), 56–61.
- Borovsky G. V., Grigoriev S. N., Maslov A. R. (2015) *Modern Materials Processing Technologies*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 304 (in Russian).
- Plaza M. (1995) The Prons and cons of High-Speed Machining. *Canadian Machinery and Metalworking*, Sep., 8–10.
- Schulz H., Moriwaki T. (1992) High – Speed Machining. *CIRP Annals*, 41 (2), 637–642. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63250-8](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63250-8).
- Gruby S. V. (2014) *Optimization of the Machining Process and Control of Operating Parameters*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publishing House. 149 (in Russian).
- Plotnikov A. L., Taube A. O. (2003) *Control of Cutting Modes on Lathes with Numerical Control*. Volgograd, Polytekhnik Publ. 184 (in Russian).
- Plasty J. (1993) High – Speed Machining. *CIRP Annals*, 42 (2), 733–738. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62536-0](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62536-0).
- Enek M., Serebryakov V. I., Shvartsburg L. E. (2010) Influence of the Coating Composition of Tool Inserts Using PVD Method on Surface Roughness During Turning. *Tekhnologiya Mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Technology], (8), 25–28 (in Russian).
- Poduraev V. N. (1974) *Cutting of Difficult-to-Cut Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 587 (in Russian).
- Pronin A. I., Myl'nikov V. V., Romanov A. D. (2018) Application of Orthogonal Central Composition Planning of Experiments to Optimize the Turning of KHVG-Hardened Steel by Cutting Ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 47 (1), 112–120. <https://doi.org/10.3103/s1052618818010132>.
- Pronin A. I., Myl'nikov V. V., Valko D. A., Sinityn I. S. (2021) A Study of the Cutting Temperature during Turning of Hardened Steels used for the Manufacture of Marine Parts. *Morskie Intellektualnye Tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2 (2), 42–46 (in Russian). <https://doi.org/10.37220/mit.2021.52.2.050>.
- Makarov A. D. (1976) *Optimization of Cutting Processes*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 278 (in Russian).

Received: 15.04.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 30.11.2023