

**В. А. Белозёров\*, Ю. А. Темпель**

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

*\*e-mail: belozerov48@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматривается моделирование физико-химического процесса ползучести, определяющего пластическую прочность режущих частей при вершинах инструментов из СТМ. Процесс ползучести связан с явлениями диффузии и диффузионным износом инструмента из СТМ в зоне квази-хрупкого перехода (то есть температурного перехода инструментальных СТМ от хрупкого к пластическому состоянию при высоких температурах резания) при тонком точении жаропрочных сплавов и сталей. Точение жаропрочных сплавов при высоких температурах резания, соответствующих квазихрупкому переходу, позволяет проводить процесс обработки на сверхвысоких скоростях резания, что расширяет области применения инструментов из СТМ. Создана математическая модель изнашивания и разрушения режущей части при вершине инструмента и СТМ вследствие явлений диффузии в процессе тонкого точения жаропрочного сплава.

*Ключевые слова:* точение; жаропрочные сплавы; диффузионный износ; пластическая прочность; инструменты из СТМ

**Plastic strength of cutting parts of tools from STM when there is turning  
heat-resistant alloys**

**Vladimir A. Belozerov\*, Yulia A. Tempel**

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

*\*e-mail: belozerov48@mail.ru*

*Abstract.* The article is devoted to the modeling of physical and chemical creep process, which determines the plastic strength of cutting parts at the vertices of the tools from STM. The creep process is associated with the phenomena of diffusion and diffusion wear of the tool from STM in the zone of quasi-brittle transition (that is, the temperature transition of tool STM from brittle to plastic state at high cutting temperatures) with thin turning of heat-resistant alloys and steels. Turning of

heat-resistant alloys at high cutting temperatures, corresponding to the quasi-brittle transition, allows the machining process at ultra-high cutting speeds, which expands the application of tools from STM. We have created mathematical model of wear and destruction of the cutting part at the top of the tool and STM due to diffusion phenomena in the process of thin turning of a heat-resistant alloy.

*Key words:* turning; heat-resistant alloys; diffusion wear; plastic strength; tools from STM

### **Введение**

Режущий инструмент может выйти из строя вследствие выкрашивания, скалывания режущей кромки или потери его первоначальной формы в результате деформации. В первом случае происходит хрупкое разрушение режущей кромки при вершине инструмента, а во втором — вязкое разрушение (при пластической деформации).

Какому виду разрушения будет подвержена режущая кромка инструмента при резании, зависит от физико-механических и химических свойств инструментального материала и способа нагружения режущего инструмента [1].

Сверхскоростное точение жаропрочных сплавов на никелевой основе инструментами из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ) почти не изучено, тогда как при сверхскоростном точении образуется не сливная стружка, а циклическая стружка с высокой неоднородностью деформации.

### **Объект и методы исследования**

Интенсифицированные параметры режима резания при тонком точении жаропрочных сплавов резцами из СТМ создают напряженно-деформированное и тепловое состояние режущей части инструмента при вершине, близкое к состоянию квазихрупкого перехода, то есть перехода от хрупкого разрушения инструментального материала к пластическому разрушению (пластическому течению) в процессе резания. Пластическое разрушение инструментального сверхтвердого материала связано с диффузионным износом режущей части при вершине инструмента из СТМ [2].

Экспериментальные исследования пластического разрушения проводились нами для режущей части инструмента из гексанита-Р при тонком точении жаропрочных сплавов.

Моделирование физико-химического процесса ползучести для создания условий пластического разрушения режущей части инструмента из СТМ при вершине осуществлялось нами при тонком точении жаропрочного сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC 37–39 на предельных режимах резания  $V = 1,67$  м/с ( $n = 2\,000$  мин<sup>-1</sup>),  $S = 0,15$  мм/об,  $t = 0,6–1$  мм, когда наблюдается сравнительно яркое свечение вершины резца. Обработка осуществлялась на универсальном токарно-винторезном станке модели 1И611П повышенной точности. Измерение температур резания и температур пластического разрушения режущей части инструмента из СТМ производилось контактным методом с применением искусственных хромель-алюмелевых термопар [3].

При исследовании процесса ползучести режущих частей при вершинах инструментов из СТМ в процессе тонкого точения жаропрочных сплавов мы опирались на работы Б. С. Бокштейна [4], Г. С. Креймера [5], В. С. Кушнера [6, 7], Т. Н. Лоладзе [2] и других авторов.

Экспериментальным исследованиям взаимодействия труднообрабатываемых сталей и сплавов с режущими частями при вершинах инструментов в процессе точения с высокими температурами резания посвящены также работы Р. Ю. Некрасова, У. С. Путиловой [8–11] и других авторов.

При использовании инструментов из СТМ на основе КНБ наблюдаются случаи их аномально высокого износа независимо от механических свойств обрабатываемых сталей и сплавов. При точении жаропрочных сплавов стойкость резцов ниже, чем при обработке закаленных до такой же твердости конструкционных сталей. В этом случае интенсивный износ инструмента из КНБ обусловлен спецификой его взаимодействия с некоторыми элементами сплавов. При высоких температурах в зоне контакта инструмента из СТМ и обрабатываемого материала происходит диффузионное взаимодействие, которое интенсифицируется при наличии в химическом составе обрабатываемого материала большого количества хрома. Проведенное исследование позволило сделать вывод, что КНБ и никель, который в больших количествах входит в химический состав жаропрочных материалов, взаимодействуют в среде водорода при температуре 1 373–1 473 К в твердой фазе с образованием боридов никеля NiB, Ni<sub>3</sub>B. При температуре 1 573–1 673 К и содержании BN сф 60 моль % в результате взаимодействия появляется жидкая фаза, которая не смачивает зерна КНБ и «выпотевает» из образцов в виде «капель». С повышением температуры отжига образцов одинакового состава содержание КНБ и никеля уменьшается, а количество боридов никеля увеличивается [12].

Температура, при которой начинается реакция нитрида бора с компонентами жаропрочных сплавов, определяет величину стойкости инструмента из КНБ. При наличии в сплаве компонентов (хрома и никеля) и температуре в зоне резания, достаточной для химической реакции между ними и нитридом бора, стойкость инструмента резко падает.

Таким образом, необходимо дальнейшее изучение механизмов разрушения и изнашивания режущих частей инструментов из СТМ при высоких температурах резания в процессе диффузионного износа для обеспечения эффективных методов повышения работоспособности и пластической прочности этих инструментов.

### **Результаты**

Экспериментально установлено, что при температуре 1 273–1 373 К начинается взаимодействие КН-ВН с хромом, который в значительном количестве входит в химический состав жаропрочных материалов. Эта температура является температурой начала диффузионного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материала (жаропрочного сплава и СТМ). Температура  $\theta^{\circ} = 1\ 373\text{ К}$  является температурой перехода СТМ (разных марок) от хрупкого к пластическому (вязкому) состоянию, то есть это температура квазихрупкого перехода для инструментальных СТМ в процессе тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей, в химический состав которых входит хром.

Далее необходимо провести анализ изменений средних контактных напряжений и коэффициентов трения на передней  $q_N$ ,  $q_F$ ,  $\mu$  и задней  $q_{N1}$ ,  $q_{F1}$ ,  $\mu_1$  поверхностях резцов из СТМ при тонком точении жаропрочных сплавов от температуры в процессе диффузионного изнашивания, необходимо окончательно определиться с диапазоном температур пластического течения (процесса ползучести) при диффузионном износе режущих частей инструментов из СТМ и других инструментальных материалов.

Анализ температурных зависимостей средних контактных напряжений  $qN$ ,  $qF$  и коэффициента трения  $\mu$  на передней поверхности в зоне контакта инструмента из гексанита-Р в процессе точения сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC 38 при диффузионном износе ( $t \geq 1$  мм;  $S = 0,15$  мм/об;  $v = 1,67$  м/с;  $-n = 2\ 000$  мин<sup>-1</sup>) показывает, что при увеличении температуры диффузионного износа от 1 373 до 18 730 К наиболее резко уменьшаются средние касательные контактные напряжения  $qF$  в 2,26 раза, а средние нормальные контактные напряжения  $qN$  уменьшаются в 2,04 раза. При этом изменение температуры диффузионного износа почти не влечет за собой изменение коэффициента трения на передней поверхности резца из гексанита-Р, который уменьшается от 0,395 до 0,382, то есть в 1,035 раза. Это связано явлениями пластического течения (ползучести) инструментального материала — гексанит-Р.

Зависимости от изменения температуры средних контактных напряжений  $qN_1$ ,  $qF_1$  и коэффициента трения  $\mu_1$  на задней поверхности инструмента из гексанита-Р в процессе точения сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC 38 при диффузионном износе позволяют сделать вывод о том, что при увеличении температуры диффузионного износа от 1 373 до 1 873 К средние нормальные контактные напряжения  $qN_1$  плавно уменьшаются от 1 000 до 730 МПа, то есть в 1,37 раза, а средние касательные контактные напряжения  $qF_1$  также плавно уменьшаются от 330 до 235 МПа, то есть в 1,435 раза. Плавное уменьшение средних контактных напряжений  $qN_1$ ,  $qF_1$  приводит к тому, что средний коэффициент трения  $\mu_1$  на задней поверхности инструмента из гексанита-Р при диффузионном износе остается почти постоянным, уменьшаясь (при увеличении температур от 1 373 до 1 873 К) от 0,33 до 0,322, то есть в 1,025 раза.

Представляет интерес сравнение величин коэффициентов трения на передней и задней поверхностях инструмента из гексанита-Р при хрупком состоянии инструментального материала и вязком состоянии (процессе ползучести при диффузионном износе). Значения коэффициентов трения на передней  $\mu = 0,67-0,6$  и задней  $\mu_1 = 0,61-0,39$  поверхностях инструмента из гексанита-Р при тонком точении сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC38 ( $t = 0,05$  мм;  $S = 0,02-0,15$  мм/об;  $V = 0,33-1,67$  м/с) получены нами при хрупком состоянии инструментального материала. Значения коэффициентов трения на передней  $\mu = 0,395-0,382$  и задней  $\mu_1 = 0,33-0,322$  поверхностях инструмента из гексанита-Р при диффузионном износе режущей части в процессе точения сплава ХН62МВКЮ-ВД, HRC38 проанализированы при вязком состоянии инструментального материала. Сравнение коэффициентов трения  $\mu$  на передней поверхности инструмента из гексанита-Р показывает, что при диффузионном износе коэффициент трения  $\mu$  уменьшается в 1,7–1,58 раза по сравнению с абразивно-механическим износом в зоне хрупкого состояния инструментального материала. Аналогично, сравнение коэффициентов трения  $\mu_1$  на задней поверхности инструмента из гексанита-Р позволяет сделать вывод, что при диффузионном износе коэффициент трения  $\mu_1$  уменьшается в 1,85–1,21 раза по сравнению с коэффициентом трения  $\mu_1$  в зоне хрупкого состояния режущей части инструмента из гексанита-Р.

В целом пластическое течение (ползучесть) при диффузионном износе приводит к стабилизации процессов трения на передней и задней поверхностях инструмента из гексанита-Р при точении жаропрочных сплавов, так как коэффициенты трения на передней и задней поверхностях становятся практически постоянными при увеличении температуры диффузионного износа.

В процессе диффузионного износа режущей части инструмента из гексани-та-Р наиболее резко уменьшаются средние контактные напряжения на передней поверхности  $qF$  в 2,26 раза,  $qN$  — в 2,04 раза.

Разработка математической модели разрушения и изнашивания инструмента из СТМ при диффузионном износе в процессе тонкого точения жаропрочного сплава предопределяет использование математических методов планирования экспериментов, применение которых обосновывает способы воздействия на исследуемый объект (то есть процесс разрушения и изнашивания инструмента из СТМ при диффузионном износе) и факторы этого воздействия (то есть контактные характеристики тонкого точения жаропрочного сплава при диффузионном износе режущей части инструмента из СТМ) [13, 14]. В то же время физическое моделирование ограничено в применении [15, 16].

Математическая модель описывает только наиболее характерные явления [17, 18]. Различают модели детерминистские и статистические.

В целом необходимо стремиться к тому, чтобы математическая модель отражала контактные процессы при резании и процесс разрушения режущей части инструмента в динамике (в развитии) протекания этих процессов.

Построение модели производится с использованием математических методов планирования эксперимента.

В число управляемых независимых переменных факторов не может быть включен параметр  $qF$ , так как, как показали исследования, при диффузионном износе  $qF$  изменяются от 310 до 137 МПа, являются меньше по величине значений  $qN$  в 2,53–2,62 раза и меньше значений  $qN_1$  в 3,32–5,34 раза. В число управляемых независимых переменных факторов не могут быть включены параметры  $\mu$  и  $\mu_1$ , так как эти факторы зависят, соответственно, от  $qN$ ,  $qF$  и  $qN_1$ ,  $qF_1$ .

В результате ранжирования факторов при построении регрессионной математической модели разрушения и изнашивания вследствие явлений диффузии режущей части инструмента из СТМ с достаточной степенью приближения принимаются следующие управляемые переменные контактные характеристики процесса резания, именуемые в дальнейшем факторами:

- 1) средние нормальные контактные напряжения на передней поверхности инструмента —  $qN$ , МПа;
- 2) средняя температура в зоне резания при диффузионном износе режущей части инструмента —  $\theta^\circ$ , К;
- 3) средние нормальные контактные напряжения на задней поверхности инструмента —  $qN_1$ , МПа;
- 4) средние касательные контактные напряжения на задней поверхности инструмента —  $qF_1$ , МПа.

Остальные контактные характеристики процесса ползучести при диффузионном износе режущей части инструмента из СТМ —  $qF$ ,  $\mu$ ,  $\mu_1$ , не отнесенные к числу переменных независимых факторов при построении математической модели, могут быть легко определены по известным зависимостям для конкретных условий по известным параметрам  $qN$ ,  $\theta^\circ$ ,  $qN_1$ ,  $qF_1$ .

Уравнение регрессии для полученной математической модели имеет вид

$$\begin{aligned} W_0 = & 3,142 \cdot qN - 3,573 \cdot \theta^\circ + 5,823 \cdot qN_1 + 8,623 \cdot qF_1 - 0,0043 \cdot qN \cdot \theta^\circ - \\ & - 0,105 \cdot qN \cdot qN_1 - 0,0166 \cdot qN \cdot qF_1 + 0,047 \cdot qF_1 \cdot \theta^\circ + 0,043 \cdot qN_1 \cdot \theta^\circ + \\ & + 0,0398 \cdot qN_1 \cdot qF_1 - 0,000010 \cdot qN \cdot qN_1 \cdot \theta^\circ + 0,000271 \cdot qN \cdot qN_1 \cdot qF_1 - \\ & - 0,000183 \cdot qN_1 \cdot qF_1 \cdot \theta^\circ - 3,125. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученная математическая модель всесторонне показывает область определения итоговой характеристики процесса (то есть относительного объемного изнашивания и разрушения режущей части инструмента из гексанита-Р вследствие явлений диффузии  $W_0$  при точении сплава ХН62МВКЮ-ВД, HR38 ) в факторном пространстве регулируемых параметров (контактных нагрузок на режущую часть инструмента).

### **Выводы**

Отличие полученной нами математической модели разрушения режущей части инструмента из СТМ от известных состоит в том, что она получена в области вязкого состояния инструментального материала, связанного с диффузионным износом режущей части инструмента из СТМ, при котором средние контактные напряжения на передней  $q_N$ ,  $q_F$  и задней  $q_{N_1}$ ,  $q_{F_1}$  поверхностях режущего инструмента почти не исследовались.

Анализ уравнения регрессии для полученной математической модели позволил установить, что влияние величин напряжений на задней поверхности  $q_{N_1}$ ,  $q_{F_1}$  инструмента из СТМ в процессе диффузионного износа на разрушение режущей части инструмента из СТМ превосходит влияние величин напряжений на передней поверхности  $q_N$  и средних температур  $\theta^\circ$  явлений диффузии. Общий вклад взаимовлияния факторов  $q_N$ ,  $\theta^\circ$ ,  $q_{N_1}$ ,  $q_{F_1}$  на процесс изнашивания и разрушения вследствие явлений диффузии режущей части инструмента из СТМ значительно превышает влияние каждой из указательных контактных характеристик (факторов) в отдельности.

При реализации на практике термомеханического подхода при выборе марки инструментального СТМ для тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей [19], а также при проведении нами экспериментальных и теоретических исследований в области пластической прочности инструментов из СТМ (с учетом тонкого точения в области квазихрупкого перехода) для сверхскоростного тонкого точения жаропрочных сплавов и сталей на станках с ЧПУ, гибких производственных модулях и обрабатывающих центрах выбраны отечественные марки инструментальных СТМ [20] — композит 10Д (гексанит-Р), композит 09 (ПТНБ), композит 05ИТ — сборные резцы с круглыми двухсторонними неперетачиваемыми пластинами, зарубежные марки инструментальных СТМ — Amorbite DBC50 002 (Англия), вюрцин (Япония), сумибороны BN200 (Япония).

### **Библиографический список**

1. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
2. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Белозёров В. А., Утешев М. Х. Моделирование процесса ползучести и энергия активации при диффузионном износе режущей части инструмента из СТМ // Научно-технические проблемы и прогнозирование надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды VI Междунар. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. – С. 70–72.
4. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
5. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
6. Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2001. – 447 с.

7. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов. – Иркутск: Издательство Иркутского ун-та, 1982. – 180 с.
8. Nekrasov R. Yu., Starikov A. A., Korchuganov M. A. Performance Assessment of Carbide Tooling under Thermal and Loading Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 414–417. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.414
9. Diagnostics of cut-layer deformation and rational tool loading in numerically controlled lathes / R. Yu. Nekrasov [et al.] // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34, Issue 12. – P. 826–828. DOI: 10.3103/S1068798X14120181
10. Nekrasov R. Yu., Soloviev I. V., Putilova U. S. Laser Interferometry Method of Stress Determination in Loaded Cutting Tool Parts // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 537–541. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.537
11. Numerical studies to determine spatial deviations of a work piece that occur when machining on CNC machines / R. Yu. Nekrasov [et al.] // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129. – Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901072>.
12. Белицкий М. Я., Гайдаренко Ф. Л., Баталин Г. И. Контактные взаимодействия нитрохрома X20H80 с нитридом бора // *Порошковая металлургия*. – 1976. – № 12. – С. 31–39.
13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
14. Налимов В. В., Чернова А. Н. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
15. Nekrasov R. Yu., Starikov A. I., Soloviev I. V. Simulation of Technological Systems for Diagnosis and Management Machining with CNC // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 617–621. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.617
16. Старков В. К. Физика и оптимизация резания металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
17. Lomova O. S. Mathematical modeling of structural changes in the surfaces of work pieces with thermal perturbations in the process of grinding // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2013. – № 2–120. – P. 95–98.
18. Моделирование систем и процессов: учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова [и др.]; под ред. В. Н. Волковой. – М.: Юрайт, 2014. – 592 с.
19. Белозеров В. А., Силич А. А., Утешев М. Х. Термомеханическая модель процесса тонкого точения жаропрочных сплавов инструментами из СТМ // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2014. – № 4. – С. 91–94.
20. Белозеров В. А., Утешев М. Х., Калиев А. Н. Сверхскоростное точение жаропрочных сплавов инструментами с двухслойными пластинами из композиционных СТМ // *Наука и технологии. Тезисы докладов XXXIII Всеросс. конф. по проблемам науки и технологий*. – Миасс, 2013. – С. 38.

### References

1. Poduraev, V. N. (1985). *Tekhnologiya fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 264 p. (In Russian).
2. Loladze, T. N. (1982). *Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 320 p. (In Russian).
3. Belozеров, V. A., & Uteshev, M. Kh. (2005). *Modelirovanie protsessa polzuchesti i energiya aktivatsii pri diffuzionnom iznose rezhushchey chasti instrumenta iz STM. Nauchno-tekhnicheskie problemy i prognozirovaniye nadezhnosti i dolgovechnosti konstruktivnykh i metody ikh resheniya. Trudy VI Mezhdunarodnoy konferentsii*. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., pp. 70-72. (In Russian).
4. Bokshcheyn, B. S. (1978). *Diffuziya v metallakh*. Moscow, Metallurgiya Publ., 248 p. (In Russian).
5. Krejmer, G. S. (1971). *Prochnost' tverdykh splavov*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow, Metallurgiya Publ., 248 p. (In Russian).
6. Vasin, S. A., Vereshchaka, A. S., & Kushner, V. S. (2001). *Rezanie metallov: Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii: uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 448 p. (In Russian).
7. Kushner, V. S. (1982). *Termomekhanicheskaya teoriya protsessa nepreryvnogo rezaniya plastichnykh materialov*. Irkutsk, Irkutsk University Publ., 180 p. (In Russian).

8. Nekrasov, R. Yu., Starikov, A. A., & Korchuganov, M. A. (2014). Performance Assessment of Carbide Tooling under Thermal and Loading Conditions. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 414-417. (In English). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.414
9. Nekrasov, R. Yu., Putilova, U. S., Nekrasov, Yu. I., Starikov, A. I., & Kharitonov, D. A. (2014). Diagnostics of cut-layer deformation and rational tool loading in numerically controlled lathes. *Russian Engineering Research*, 34(12), pp. 826-828. (In English). DOI: 10.3103/S1068798X14120181
10. Nekrasov, R. Yu., Soloviev, I. V., & Putilova, U. S. (2015). Laser Interferometry Method of Stress Determination in Loaded Cutting Tool Parts. *Applied Mechanics and Materials*, 698, pp. 537-541. (In English). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.537
11. Nekrasov, R. Yu., Tempel, Yu. A., Tempel, O. A., Solovyov, I. V., & Starikov, A. I. (2017). Numerical studies to determine spatial deviations of a work piece that occur when machining on CNC machines. *MATEC Web of Conferences*, 129. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901072>
12. Belitskiy, M. Ya., Gaydarenko, F. L., & Batalin, G. I. (1976). Kontaktnye vzaimodeystviya nikhroma KH20N80 s nitridom bora. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, (12), pp. 31-39. (In Russian).
13. Adler, Yu. P., Markova, E. V., & Granovskiy, Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy*. Moscow, Nauka Publ., 279 p. (In Russian).
14. Nalimov, V. V., & Chernova, A. N. (1965). *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov*. Moscow, Nauka Publ., 340 p. (In Russian).
15. Nekrasov, R. Yu., Starikov, A. I., & Soloviev, I. V. (2015). Simulation of Technological Systems for Diagnosis and Management Machining with CNC. *Applied Mechanics and Materials*, 770, pp. 617-621. (In English). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.617
16. Starkov, V. K. (2009). *Physics and optimization of cutting of materials* Moscow, Mashinostroenie Publ., 640 p. (In Russian).
17. Lomova, O. S. (2013). Mathematical modeling of structural changes in the surfaces of work pieces with thermal perturbations in the process of grinding. *Omsk Scientific Bulletin*, (2-120), pp. 95-98. (In English).
18. Volkova, V. N., Kozlov, V. N., Lypar', Yu. I., Firsov, A. N., Chernen'kaya, L. V., Gorelova, G. V., & Paklin, N. B. (2014). *Modelirovanie sistem i protsessov*. Moscow, Urait Publ., 592 p. (In Russian).
19. Belozеров, V. A., Silich, A. A., & Uteshev, M. H. (2014). Thermomechanical model of the process of fine turning of heat-resistant alloys by tools from STM. *Higher educational institutions news. Neft' i gaz*, (4), pp. 91-94. (In Russian).
20. Belozеров, V. A., Uteshev, M. Kh., & Kaliev, A. N. (2013). Sverkhskorostnoe tochenie zharoprochnykh splavov instrumentami s dvukhsloynymi plastinami iz kompozitsionnykh STM. *Nauka i tekhnologii. Tezisy dokladov XXXIII Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i tekhnologiy*. Miass, p. 38. (In Russian).

#### **Сведения об авторах**

**Белозёров Владимир Анатольевич**, к. т. н., доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: [belozеров48@mail.ru](mailto:belozеров48@mail.ru)

**Темпель Юлия Александровна**, ассистент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

#### **Information about the authors**

**Vladimir A. Belozеров**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen, e-mail: [belozеров48@mail.ru](mailto:belozеров48@mail.ru)

**Yulia A. Tempel**, Assistant at the Department of Technology of Machine Building, Industrial University of Tyumen