

Исследование изнашивания режущего инструмента при точении сплава ТН1

П.В. Целиков^a, А.Г. Кисель^b

Калининградский государственный технический университет, Советский пр. 1, Калининград, Россия

^a patersort@list.ru, ^b anton.kisel@klgtu.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>

Статья поступила 26.02.2025, принята 28.04.2025

В статье представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых являлось определение зависимости интенсивности изнашивания режущей пластины от режимов токарной обработки заготовки из сплава с памятью формы марки ТН1. При достижении поставленной цели решены следующие задачи: проведены стойкостные испытания при различных режимах токарной обработки заготовок из сплава с памятью формы; выведены математические зависимости интенсивности изнашивания режущей пластины от параметров режима резания; установлены закономерности изменения исследуемого параметра; разработаны рекомендации применения режимов обработки. В результате проведенных исследований были получены следующие результаты: установлены закономерности изменения износа режущих пластин при различных режимах токарной обработки заготовок из сплава с памятью формы марки ТН1, представленные в виде графиков зависимостей; определены величины интенсивности изнашивания режущих пластин при различных режимах резания до износа по заданной поверхности 0,3 мм; выведены математические зависимости для расчета интенсивности изнашивания режущей пластины при различных режимах обработки; установлены рациональные режимы резания заготовки из сплава с памятью формы марки ТН1 (с точки зрения интенсивности изнашивания режущей пластины). Относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,1$ мм составила $\pm 20,7$ %; относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,3$ мм составила $\pm 5,1$ %. Объяснением расхождения в результатах для $t = 0,1$ мм может служить явление наклепа поверхностного слоя, толщина которого сопоставима с глубиной резания.

Ключевые слова: токарная обработка; интенсивность изнашивания; износ режущей пластины; сплав с памятью формы; режим резания.

Investigation of the dependence of the wear intensity of the cutting tool during turning of TN1 alloy

P.V. Tselikov^a, A.G. Kisel^b

Kaliningrad State Technical University; 1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia

^a patersort@list.ru, ^b anton.kisel@klgtu.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>

Received 26.02.2025, accepted 28.04.2025

The article presents the results of experimental studies aimed at determining the dependence of the wear rate of the cutting plate on the turning modes of a workpiece made of a shape memory alloy of the TN1 brand. Upon achieving this goal, the following tasks have been solved: resistance tests have been carried out under various modes of turning blanks made of shape memory alloy; mathematical dependences of the intensity of wear of the cutting plate on the parameters of the cutting mode have been derived; patterns of change of the parameter under study have been established; recommendations for the application of processing modes have been developed. As a result of the conducted studies, the following results are obtained: the patterns of wear changes in cutting plates under various modes of turning blanks made of shape memory alloy grade TN1, presented in the form of graphs of dependencies, are established; the values of wear intensity of cutting plates under different cutting modes before wear on the back surface of 0.3 mm are determined; mathematical dependencies are derived for calculation of the wear rate of the cutting plate under various processing modes; rational cutting modes of a billet made of a shape memory alloy of the TN1 brand are established (in terms of the wear rate of the cutting plate). The relative calculation error for modes with a cutting depth of $t=0.1$ mm is $\pm 20.7\%$; the relative calculation error for modes with a cutting depth of $t=0.3$ mm is $\pm 5.1\%$. The discrepancy in the results for $t = 0.1$ mm can be explained by the phenomenon of riveting of the surface layer, the thickness of which is comparable to the cutting depth.

Keywords: turning; wear rate; cutting plate wear; shape memory alloy; cutting mode.

Введение. При производстве изделий, в которых свойства некоторых деталей должны зависеть от температуры окружающей среды, применяют материалы, обладающие эффектом памяти формы. Примерами применения таких материалов могут служить следующие

сферы производства: аэрокосмическая техника [1–5]; медицинская техника [3–7]; трубопроводы [8–11]; ветеринария [12, 13]; нефтедобывающая промышленность [14] и др. [3, 15].

При производстве деталей из данных сплавов их подвергают различным видам обработки: лезвийной [4, 16, 17], эрозионной [6, 18], лазерной [19, 20] и др. Однако отсутствуют рекомендации по применению режимов резания для обеспечения рационального изнашивания режущего инструмента, качества поверхности и производительности.

Поэтому целью данной работы стало экспериментальное определение зависимости интенсивности изнашивания режущей пластины от режимов токарной обработки заготовки из сплава с памятью формы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести стойкостные испытания в соответствии с планом эксперимента при различных режимах токарной обработки заготовок из сплава с памятью формы;
- вывести математические зависимости исследуемого параметра от параметров режима резания;
- установить закономерности изменения исследуемого параметра;
- разработать рекомендации применения режимов обработки.

Постановка эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на токарном станке модели УТС6 (рис. 1). Для получения достоверных результатов по влиянию на процесс обработки режимов резания смазочно-охлаждающие жидкости как дополнительный влияющий фактор не применялись.



Рис. 1. Внешний вид станка модели УТС6

В качестве режущего инструмента применялся токарный резец со сменной твердосплавной режущей пластиной ССМТ09Т308-ЕМ с покрытием PVD производства компании ZCC-СТ. Данная режущая пластина может применяться для чистовых и получистовых режимов обработки заготовок из жаро- и коррозионно-стойких сплавов.

Заготовка была выполнена из сплава ТН1 как одного из распространенных сплавов эффектом памяти формы (ЭПФ) и имела диаметр 10 мм.

Внешний вид заготовки и резца в процессе проведения испытаний представлен на рис. 2.

Применявшиеся при исследованиях режимы обработки, соответствующие используемым на машиностроительных предприятиях при точении исследуемого материала, представлены в табл. 1. Варьируемыми факторами были скорость резания V , м/мин.; подача S , мм/об; глубина резания t , мм.

Контролируемым параметром был принят износ режущей пластины по задней поверхности. Величина износа определялась по наибольшей высоте изношенного участка с помощью цифрового микроскопа (рис. 3), настроенного по тарировочной шкале (рис. 4), и САД-системы КОМПАС-3D (рис. 5). Предельное значение износа, до которого изнашивалась пластина, с целью сокращения времени проведения испытаний, было принято равным 0,3 мм.

Таблица 1. План эксперимента

№ опыта	V , м/мин.	S , мм/об	t , мм
1	5	0,03	0,1
2	30	0,03	0,1
3	5	0,2	0,1
4	30	0,2	0,1
5	5	0,03	0,3
6	30	0,03	0,3
7	5	0,2	0,3
8	30	0,2	0,3



Рис. 2. Внешний вид заготовки и резца при испытаниях



Рис. 3. Внешний вид применявшегося цифрового микроскопа

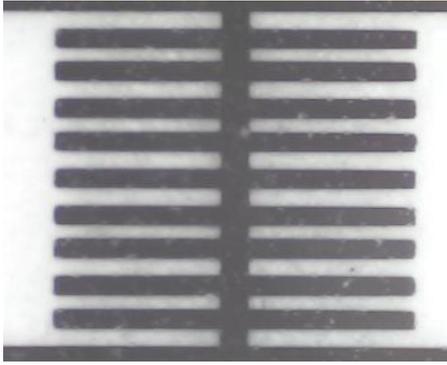


Рис. 4. Тарировочная шкала для настройки цифрового микроскопа (соответствует 1 мм)



Рис. 5. Измерение износа режущей пластины

В качестве параметра, по которому оценивались стойкостные свойства режущей пластины, была принята интенсивность изнашивания, определявшаяся по формуле:

$$\delta_V = \frac{h_{3.lim}}{V_{удал.}}, \quad (1)$$

где $h_{3.lim}$ – предельное значение износа, до которого изнашивалась пластина, мм; $V_{удал.}$ – объем удаленного с заготовки материала за время достижения предельного износа, мм³.

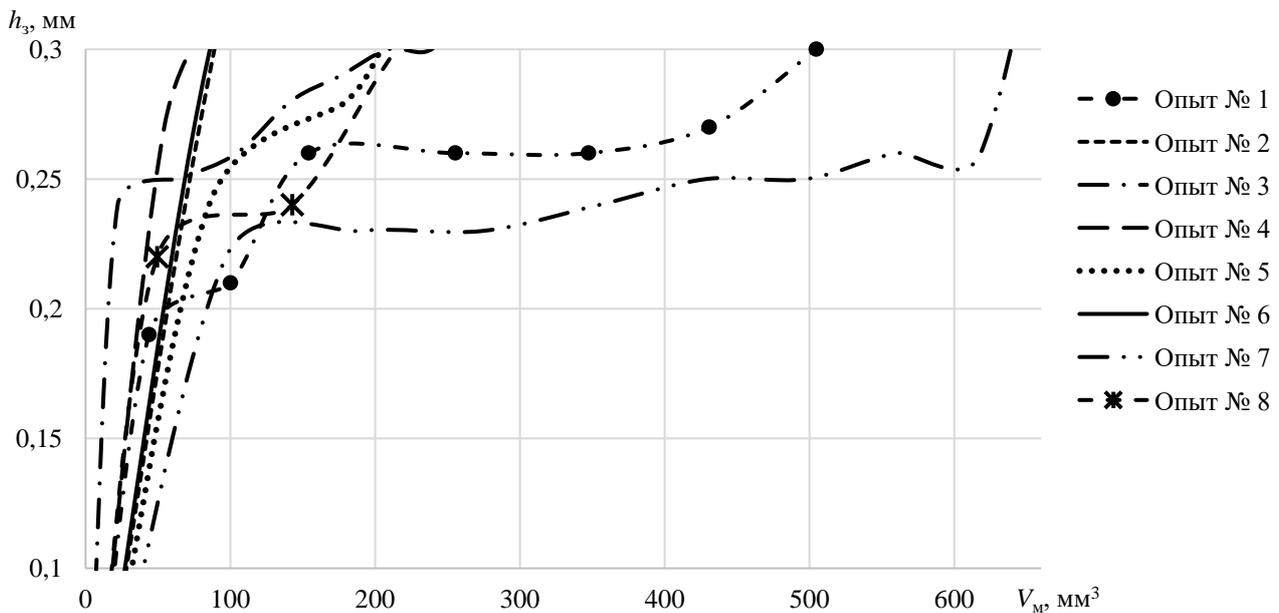


Рис. 6. Графики зависимостей величины износа режущей пластины от объема удаленного материала

Результаты исследований. По результатам проведенных исследований были построены графики зависимостей величины износа режущего инструмента по задней поверхности h_3 , мм, от объема удаленного материала заготовки, мм³, для каждого опыта (рис. 6).

Экспериментально установленные величины интенсивности изнашивания режущей пластины сводились в табл. (табл. 2).

Таблица 2. Результаты исследований интенсивности изнашивания режущей пластины

№ опыта	$V_{удал.}, \text{мм}^3$	$\delta_V, 10^{-3} \text{мм}^{-2}$
1	504,63	0,594
2	91,72	3,271
3	209,07	1,435
4	80,58	3,723
5	206,83	1,45
6	87,10	3,444
7	632,09	0,475
8	217,91	1,377

Полученные результаты показывают, что наиболее рациональными из испытанных режимов являются:

1. $V = 5$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об, $t = 0,3$ мм – $\delta_V = 0,475 \cdot 10^{-3} \text{мм}^{-2}$;
2. $V = 5$ м/мин, $S = 0,03$ мм/об, $t = 0,1$ мм – $\delta_V = 0,594 \cdot 10^{-3} \text{мм}^{-2}$.

Оценка полученных результатов позволила установить следующую закономерность: величина экспериментальных значений интенсивности изнашивания режущей пластины при большей глубине резания соответствует рассчитанным по выводимым эмпирическим зависимостям значениям с незначительной относительной погрешностью. При снижении глубины резания погрешность повышается. Поэтому было принято решение выводить зависимости для разных величин глубины резания по отдельности.

С целью определения зависимости интенсивности изнашивания от параметров режима обработки были выполнены расчеты и установлены константы эмпирических зависимостей по следующим выражениям:

$$X_{0,1} = \frac{\lg\left(\sqrt{\frac{\delta_{V2} \cdot \delta_{V4}}{\delta_{V1} \cdot \delta_{V3}}}\right)}{\lg\left(\frac{V_B}{V_H}\right)}, X_{0,3} = \frac{\lg\left(\sqrt{\frac{\delta_{V6} \cdot \delta_{V8}}{\delta_{V5} \cdot \delta_{V7}}}\right)}{\lg\left(\frac{V_B}{V_H}\right)}, \quad (2)$$

$$Y_{0,1} = \frac{\lg\left(\sqrt{\frac{\delta_{V3} \cdot \delta_{V4}}{\delta_{V1} \cdot \delta_{V2}}}\right)}{\lg\left(\frac{S_B}{S_H}\right)}, Y_{0,3} = \frac{\lg\left(\sqrt{\frac{\delta_{V7} \cdot \delta_{V8}}{\delta_{V5} \cdot \delta_{V6}}}\right)}{\lg\left(\frac{S_B}{S_H}\right)}, \quad (3)$$

$$C_{\delta_v,0,1} = \frac{\sqrt[4]{\delta_{V1} \cdot \delta_{V2} \cdot \delta_{V3} \cdot \delta_{V4}}}{(V_B \cdot V_H)^{X_{0,1}/2} (S_B \cdot S_H)^{Y_{0,1}/2}}, \quad (4)$$

$$C_{\delta_v,0,3} = \frac{\sqrt[4]{\delta_{V5} \cdot \delta_{V6} \cdot \delta_{V7} \cdot \delta_{V8}}}{(V_B \cdot V_H)^{X_{0,3}/2} (S_B \cdot S_H)^{Y_{0,3}/2}},$$

где δ_{Vi} – интенсивность изнашивания в i -ом эксперименте; V_B, V_H – соответственно, верхнее и нижнее значения применявшихся скоростей резания, м/мин; S_B, S_H – соответственно, верхнее и нижнее значения применявшихся подач, мм/об; $X_{0,1}, X_{0,3}$ – соответственно, показатели степени скорости резания при глубинах резания 0,1 и 0,3 мм; $Y_{0,1}, Y_{0,3}$ – соответственно, показатели степени величины подачи при глубинах резания 0,1 и 0,3 мм.

В результате были получены зависимости вида:

$$\delta_v = C_{\delta_v} \cdot V^x \cdot S^y. \quad (6)$$

Расчеты по выражениям 2–4 позволили определить требуемые константы (табл. 3).

Таблица 3. Константы формулы для расчета интенсивности изнашивания

Константы	Значения при t	
	0,1 мм	0,3 мм
X	0,74210	0,53841
Y	0,26658	-0,53574
C_{δ_v}	0,55305	0,08862

Далее с целью оценки степени точности полученных выражений в формулу 6 были подставлены найденные коэффициенты и посчитаны величины интенсивности изнашивания при тех же режимах обработки. Установленные расчетным путем значения представлены в табл. 4.

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по выведенным зависимостям показало:

- относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,1$ мм составила $\pm 20,7\%$;
- относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,3$ мм составила $\pm 5,1\%$.

Объяснением данного расхождения в результатах может служить явление наклепа поверхностного слоя заготовки в процессе ее обработки в радиальном направлении. При малых значениях глубины резания, сопоставимых с толщиной наклепанного слоя, режущая кромка в разные моменты времени находится в зоне наклепанного слоя и в зоне слоя, не подверженного упрочнению. Это вносит погрешность в результаты. При повышении глубины резания режущая кромка находится в более стабильных условиях резания, что объясняет меньшую погрешность расчетов.

Таблица 4. Расчетные значения интенсивности изнашивания режущей пластины

№ опыта	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	$\delta_v, 10^{-3} \text{ мм}^2$ (эксп.)	$\delta_v, 10^{-3} \text{ мм}^2$ (расч.)
1	5	0,03	0,1	0,594	0,717
2	30	0,03		3,271	2,710
3	5	0,2		1,435	1,189
4	30	0,2	0,3	3,723	4,494
5	5	0,03		1,45	1,380
6	30	0,03		3,444	3,620
7	5	0,2		0,475	0,499
8	30	0,2	1,377	1,31	

Также при большей величине глубины резания и увеличении подачи от 0,03 до 0,2 мм/об интенсивность изнашивания режущей пластины снижается, что можно объяснить явлением наклепа, который появляется в обрабатываемом материале в направлении движения подачи.

С целью достижения большей сходимости результатов расчета величины интенсивности изнашивания при различных режимах резания и результатов экспериментальных данных был выполнен анализ в программе "Statistica". Для этого в программу были введены результаты экспериментов и получены поверхности отклика (рис. 7) и следующие эмпирические зависимости:

– для глубины резания $t = 0,1$ (см. рис. 7, а):

$$\delta_v = 0,0807 + 0,0993 \cdot V + 3,8029 \cdot S; \quad (7)$$

– для глубины резания $t = 0,3$ (см. рис. 7, б):

$$\delta_v = 1,7018 + 0,0579 \cdot V - 8,9471 \cdot S. \quad (8)$$

Аналогично с проверкой зависимостей, представленных ранее (выражение 6 с коэффициентами из таблицы 3), были выполнены расчеты по формулам 7 и 8. Результаты этих расчетов в сравнении с экспериментальными данными представлены в табл. 5.

Таблица 5. Расчетные значения интенсивности изнашивания режущей пластины с помощью программы "Statistica"

№ опыта	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	$\delta_v, 10^{-3} \text{ мм}^2$ (эксп.)	$\delta_v, 10^{-3} \text{ мм}^2$ (расч.)
1	5	0,03	0,1	0,594	0,691
2	30	0,03		3,271	3,174
3	5	0,2		1,435	1,338
4	30	0,2	0,3	3,723	3,820
5	5	0,03		1,45	1,723
6	30	0,03		3,444	3,170
7	5	0,2		0,475	0,202
8	30	0,2	1,377	1,649	

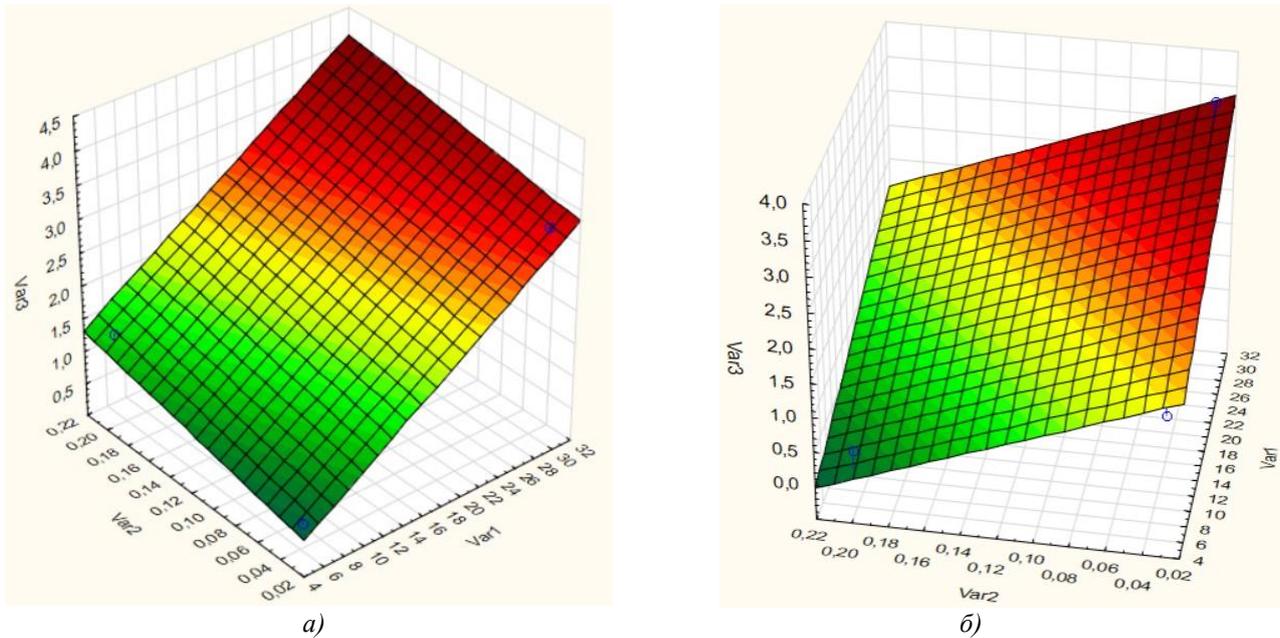


Рис. 7. Поверхности отклика для зависимостей интенсивности изнашивания (Var3) режущей пластины от скорости резания (Var1) и подачи (Var2) при точении заготовки из сплава ТН1 при различных глубинах резания: а – 0,1 мм; б – 0,3 мм

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по зависимостям, выведенным в программе "Statistica", показало:

- максимальная относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,1$ мм составила $\pm 16,4\%$;
- максимальная относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,3$ мм составила $\pm 57,5\%$.

Оценка результатов проверки эмпирических зависимостей на их сходимость с результатами экспериментальных исследований показала, что расчет в программе "Statistica" дает результаты с большей точностью для обработки с глубиной резания $t = 0,1$ мм. В то же время результаты расчетов для глубины резания $t = 0,3$ мм получаются с недопустимо большой погрешностью, поэтому не могут быть приняты для прогнозирования величины интенсивности изнашивания.

Таким образом, окончательно принятые зависимости для прогнозирования величины интенсивности изнашивания режущего инструмента при токарной обработке сплава с памятью формы марки ТН1 следующие:

- для $t = 0,1$ мм:

$$\delta_v = 0,0807 + 0,0993 \cdot V + 3,8029 \cdot S. \quad (9)$$

- для $t = 0,3$ мм:

$$\delta_v = 0,08862 \cdot V^{0,53841} \cdot S^{-0,53574}. \quad (10)$$

Также следует сказать, что разброс стойкости режущего инструмента даже из одной партии, как указано в исследованиях авторов Г.М. Мартинова, А.С. Григорьева, Х.Ч. Данг, представленных в публикациях [21, 22], может принимать значения от 15 до 35 %. Таким образом, полученные в данной работе результаты согласуются с общей тенденцией, поэтому могут быть приняты для прогнозирования интенсивности изнашивания с указанием возможной погрешности.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в установлении следующих рациональных параметров режима резания заготовки из сплава с памятью формы марки ТН1 (с точки зрения интенсивности изнашивания режущей пластины):

- при чистовой обработке (малых глубинах резания) целесообразно применять малую скорость резания и величину подачи: $V = 5$ м/мин., $S = 0,03$ мм/об, $t = 0,1$ мм;
- при черновой (получистовой) обработке (относительно больших глубинах резания) целесообразно применять малую скорость резания и большую величину подачи: $V = 5$ м/мин., $S = 0,2$ мм/об, $t = 0,3$ мм.

Выводы. В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Установлены закономерности изменения износа режущих пластин при различных режимах токарной обработки заготовок из сплава с памятью формы марки ТН1, представленные в виде графиков зависимостей;
2. Определены величины интенсивности изнашивания режущих пластин при различных режимах резания до износа по задней поверхности 0,3 мм;
3. Выведены математические зависимости для расчета интенсивности изнашивания режущей пластины при различных режимах обработки – (9) и (10).

Относительная погрешность расчетов для режимов с глубиной резания $t = 0,1$ мм составила $\pm 16,4\%$, а с глубиной резания $t = 0,3$ мм – $\pm 5,1\%$.

Объяснением расхождения в результатах для $t = 0,1$ мм может служить явление наклепа поверхностного слоя, толщина которого сопоставима с глубиной резания.

4. Оценка полученных результатов позволила установить следующую закономерность: величина экспериментальных значений интенсивности изнашивания режущей пластины при большей глубине резания соот-

ветствует рассчитанным по выводимым эмпирическим зависимостям значениям с незначительной относительной погрешностью $\pm 5,1$ %. При снижении глубины резания эта погрешность повышается.

5. Установлены рациональные режимы резания заготовки из сплава с памятью формы марки ТН1 (с точки зрения интенсивности изнашивания режущей пластины):

Литература

1. Патент № 2821357 С1 Российская Федерация, МПК F16K 17/38, F16K 17/40. Клапан однократного действия высокого давления: № 2023130441: заявл. 21.11.2023: опубл. 21.06.2024 / Н.М. Вертаков, В.А. Гречушников, А.В. Кашов, В.А. Панфилов; заяв. Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро "Факел"».
2. Логачева А.И. Гранулированный сплав с эффектом памяти формы на основе никелида титана для изделий космической техники // *Металлы*. 2014. № 6. С. 89-94.
3. Suresh, G., Ramesh, M.R., Srinath, M.S. Surface Engineered Titanium Alloys for Biomedical, Automotive, and Aerospace Applications // *Advances in Processing of Lightweight Metal Alloys and Composites. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Singapore: Springer, 2023. P. 89-102. DOI: 10.1007/978-981-19-7146-4_5
4. Kundiya R.R., Kadam M., Jadhav P., Pawade R. A review on high speed micro-milling of shape memory alloy (NiTiInol): process and post perspective // *Internat. Journ. on Interactive Design and Manufacturing*. 2024. Vol. 19(4). P. 2337-2353. DOI: 10.1007/s12008-024-02153-x
5. Gantz F., Stroud H., Fuller J.C., Adams K. Aerospace, Energy Recovery, and Medical Applications: Shape Memory Alloy Case Studies for CASMART 3rd Student Design Challenge // *Shap. Mem. Superelasticity*. 2022. Vol. 8. P. 150-167. DOI: 10.1007/s40830-022-00368-z
6. Goyal A., Pandey A., Rahman H.U.R. Present and future perspective of shape memory alloys during machining by EDM/wire EDM process: a review // *Sādhanā*. 2022. Vol. 47. P. 217. DOI: 10.1007/s12046-022-01999-9
7. Rajak S.K., Harikrishna K., Seetharam R. et al. Microstructure and Mechanical Behavior of Various Solution Treated Biomedical Superelastic NiTi Shape Memory Alloy: An Experimental Investigation // *Journ. of Materi Eng and Perform*. 2025. Vol. 34, Iss. 8 <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10701-z>.
8. Liu Q., Xin S. Numerical Analysis of Shape Memory Alloy Pipe Joint in Aerospace Hydraulic System // *Recent Advances in Materials and Manufacturing Technology. ICAMMT 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer, 2023. P. 669-681. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2921-4_61
9. Андронов И.Н. Использование соединения из материала с памятью в качестве функционального элемента водоводов высокого давления // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2016. № 10. С. 45-49.
10. Шумилов И.С. Термомеханические соединения трубопроводов авиационных систем управления. Перспективы // *Гидравлика*. 2018. № 1(5). С. 175-193.
11. Попов Н.Н., Ларькин В.Ф., Пресняков Д.В. Разборные термомеханические соединения трубопроводов муфтами, изготовленными из сплавов с памятью формы систем Ti-Ni-Fe и Ti-Ni-Nb // *Тр. Росс. федерал. ядерного центра – Всеросс. науч.-исслед. ин-та экспериментал. физики*. 2018. № 23-2. С. 348-361.
12. Чернигова С.В. Обоснование состояния анатомических структур позвоночно-двигательного сегмента при остеосинтезе позвоночника у собак методами объективного контроля // *Изв. Междунар. академии аграрного образования*. 2018. № 42-2. С. 197-201.
13. Козлов Н.А. Современные материалы для имплантов применяемые в лечении собак с синдромом Воблера // *Уч. зап. Казанской государственной академии ветеринарной медицины*. 2021. Т. 248, № 4. С. 123-128. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-248-4-123-128
14. Лопухов А.Н. Применение интеллектуальных сплавов для автоматизации нефтепромыслов // *Нефть. Газ. Новации*. 2012. № 10(165). С. 70-76.
15. Honrao S.J., Benafan O., Lawson J.W. Data-Driven Study of Shape Memory Behavior of Multi-Component Ni-Ti Alloys in Large Compositional and Processing Space // *Shap. Mem. Superelasticity*. 2023. Vol. 9. P. 144-155. DOI: 10.1007/s40830-022-00405-x
16. Zailani Z.A., Mativenga, P.T. Machinability of nickel-titanium shape memory alloys under dry and chilled air cutting conditions // *The Internat. Journ. of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 126. P. 4675-4684. DOI: 10.1007/s00170-023-11373-6
17. Vora J., Jain A., Sheth M., Gajjar K., Abhishek K., Chaudhari R. A Review on Machining Aspects of Shape Memory Alloys // *Recent Advances in Mechanical Infrastructure*. Singapore: Springer, 2022. P. 449-458. DOI: 10.1007/978-981-16-7660-4_40
18. Dutta S., Singh A.K., Paul B., Paswan M.K. Machining of shape-memory alloys using electrical discharge machining with an elaborate study of optimization approaches: a review // *Journ. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. P. 557. DOI: 10.1007/s40430-022-03826-y
19. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and Electron-Beam Surface Processing on NiTi Shape Memory Alloys: A Review. *Russian Physics Journ*. 2024. Vol. 67. P. 565-615. DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5
20. Schuleit M., Kutlu Y., Maaß B., Stötzel N., Frenzel J., Esen C., Eggeler G., Ostendorf A. Temperature-Controlled Laser Processing of Shape Memory Wires: Spherical Ends as Connectors for System Integration // *Shape Memory and Superelasticity*. 2024. Vol. 10. P. 225-236. DOI: 10.1007/s40830-024-00481-1
21. Мартинов Г.М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // *Станки Инструмент*. 2012. № 12. С. 23-27.
22. Данг Х.Ч. Повышение эффективности концевой и торцевой фрезерования на основе контроля износа фрез по уровню вибрации: дисс. ... канд. технич. наук. Тула: Изд-во Тул. гос. ун-та, 2021. 140 с.

References

1. Patent № 2821357 С1 Russian Federation, MPK F16K 17/38, F16K 17/40. Single-acting valve of high pressure: № 2023130441: avv. 21.11.2023: published 21.06.2024 / N.M. Vertakov, V.A. Grechushnikov, A.V. Katashov, V.A.

- Panfilov; application. Joint Stock Company «Experimental Design Bureau «Fakel»».
2. Logacheva A.I. Granulated alloy with shape memory effect based on titanium nickelide for space technology products // *Metals*. 2014. № 6. P. 89-94.
 3. Suresh, G., Ramesh, M.R., Srinath, M.S. Surface Engineered Titanium Alloys for Biomedical, Automotive, and Aerospace Applications // *Advances in Processing of Lightweight Metal Alloys and Composites. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials*. Singapore: Springer, 2023. P. 89-102. DOI: 10.1007/978-981-19-7146-4_5
 4. Kundiya R.R., Kadam M., Jadhav P., Pawade R. A review on high speed micro-milling of shape memory alloy (NiTiInol): process and post perspective // *Internat. Journ. on Interactive Design and Manufacturing*. 2024. Vol. 19(4). P. 2337-2353. DOI: 10.1007/s12008-024-02153-x
 5. Gantz F., Stroud H., Fuller J.C., Adams K. Aerospace, Energy Recovery, and Medical Applications: Shape Memory Alloy Case Studies for CAsMART 3rd Student Design Challenge // *Shap. Mem. Superelasticity*. 2022. Vol. 8. P. 150-167. DOI: 10.1007/s40830-022-00368-z
 6. Goyal A., Pandey A., Rahman H.U.R. Present and future prospective of shape memory alloys during machining by EDM/wire EDM process: a review // *Sādhanā*. 2022. Vol. 47. P. 217. DOI: 10.1007/s12046-022-01999-9
 7. Rajak S.K., HariKrishna K., Seetharam R. et al. Microstructure and Mechanical Behavior of Various Solution Treated Biomedical Superelastic NiTi Shape Memory Alloy: An Experimental Investigation // *Journ. of Materi Eng and Perform*. 2025. Vol. 34, Iss. 8 <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10701-z>.
 8. Liu Q., Xin S. Numerical Analysis of Shape Memory Alloy Pipe Joint in Aerospace Hydraulic System // *Recent Advances in Materials and Manufacturing Technology. ICAMMT 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer, 2023. P. 669-681. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2921-4_61
 9. Andronov I.N. Use of compound from memory material as a functional element of high-pressure water conduits // *Construction of oil and gas wells onshore and offshore*. 2016. № 10. P. 45-49.
 10. Shumilov, I.S. Thermomechanical joints of pipelines of aviation control systems. Prospects // *Hydraulics*. 2018. № 1(5). P. 175-193.
 11. Popov N.N., Larkin V.F., Presnyakov D.V. Disassembled thermomechanical joints of pipelines by couplings made of the shape memory alloys of Ti-Ni-Fe and Ti-Ni-Nb systems // *Proceedings of the Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics*. 2018. № 23-2. P. 348-361.
 12. Chernigova S.V. Justification of the state of the anatomical structures of the vertebral-motor segment at osteosynthesis of the spine in dogs by methods of objective control // *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2018. № 42-2. P. 197-201.
 13. Kozlov N.A. Modern materials for implants used in the treatment of dogs with Wobbler's syndrome // *Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine*. 2021. Vol. 248, № 4. P. 123-128. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-248-4-123-128
 14. Lopukhov A.N. Application of intellectual alloys for oilfield automation // *Neft. Gaz. Novatsii*. 2012. № 10(165). P. 70-76.
 15. Honrao S.J., Benafan O., Lawson J.W. Data-Driven Study of Shape Memory Behavior of Multi-Component Ni-Ti Alloys in Large Compositional and Processing Space // *Shap. Mem. Superelasticity*. 2023. Vol. 9. P. 144-155. DOI: 10.1007/s40830-022-00405-x
 16. Zailani Z.A., Mativenga, P.T. Machinability of nickel-titanium shape memory alloys under dry and chilled air cutting conditions // *The Internat. Journ. of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 126. P. 4675-4684. DOI: 10.1007/s00170-023-11373-6
 17. Vora J., Jain A., Sheth M., Gajjar K., Abhishek K., Chaudhari R. A Review on Machining Aspects of Shape Memory Alloys // *Recent Advances in Mechanical Infrastructure*. Singapore: Springer, 2022. P. 449-458. DOI: 10.1007/978-981-16-7660-4_40
 18. Dutta S., Singh A.K., Paul B., Paswan M.K. Machining of shape-memory alloys using electrical discharge machining with an elaborate study of optimization approaches: a review // *Journ. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 44. P. 557. DOI: 10.1007/s40430-022-03826-y
 19. Slobodyan M.S., Markov A.B. Laser and Electron-Beam Surface Processing on NiTi Shape Memory Alloys: A Review. *Russian Physics Journ*. 2024. Vol. 67. P. 565-615. DOI: 10.1007/s11182-024-03158-5
 20. Schüleit M., Kutlu Y., Maaß B., Stötzel N., Frenzel J., Esen C., Eggeler G., Ostendorf A. Temperature-Controlled Laser Processing of Shape Memory Wires: Spherical Ends as Connectors for System Integration // *Shape Memory and Superelasticity*. 2024. Vol. 10. P. 225-236. DOI: 10.1007/s40830-024-00481-1
 21. Martinov G.M. Diagnostics of the cutting tools and prediction of their residual durability on the CNC machines in the process of machining // *Stanki Instrument*. 2012. № 12. P. 23-27.
 22. Dang H.C. Increase of efficiency of end and face milling on the basis of control of wear of milling cutters on the level of vibration: dissertation. ... cand. of technical sciences. Tula: Publishing house of Tula State University, 2021. 140 p.