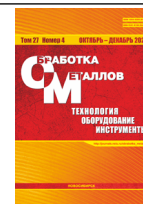




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Прогнозирование интенсивности изнашивания инструмента при обработке никелида титана ТН-1





Антон Кисель^{1, 2, a, *}, Николай Бобровский^{1, 3, b}, Дмитрий Подашев^{2, c},
Павел Целиков^{2, d}, Ренат Каменов^{1, 3, e}



¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, г. Москва, г. Зеленоград, 124498, Россия

² Калининградский государственный технический университет, Советский пр., 1, г. Калининград, 236022, Россия

³ Тольяттинский государственный университет, ул. Белорусская, 14, г. Тольятти, 445020, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>,  kisel1988@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-9299-2822>,  bobbrnm@yandex.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>,  dbp90@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>,  patersort@list.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>,  renatkamenov@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.01

История статьи:

Поступила: 11 сентября 2025

Рецензирование: 25 сентября 2025

Принята к печати: 11 ноября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Никелид титана

Стружка

Интенсивность изнашивания

Коэффициент усадки

Инструмент

Прогнозирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00298-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00298/>

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из важнейших критериев оценки эффективности выбранной стратегии обработки заготовок является интенсивность изнашивания инструмента. Снижение интенсивности изнашивания приводит к уменьшению издержек производства, связанных с затратами на обрабатываемый инструмент, и к повышению производительности в целом. **Цель данной работы:** снижение интенсивности изнашивания инструмента при обработке заготовки из сплава с памятью формы никелида титана ТН-1. **Методы.** В рамках исследований выполнялся полный трехфакторный эксперимент по токарной обработке заготовки из указанного сплава с целью определения интенсивности изнашивания режущей пластины при широких диапазонах варьирования параметров режима резания. При испытаниях у получаемой стружки измерялись геометрические параметры толщина и ширина. Путем построения графиков зависимостей от параметров стружки, аппроксимации полученных зависимостей и оценки величины достоверности аппроксимации каждой из них определялся параметр для разработки методики прогнозирования интенсивности изнашивания. **Результаты и обсуждение.** В работе доказано, что для прогнозирования величины интенсивности изнашивания режущей пластины при точении заготовки из никелида титана ТН-1 целесообразно использовать зависимость от толщины получаемой стружки. Установленная математическая зависимость описывается системой уравнений, позволяющей определить интенсивность изнашивания режущей пластины и погрешность этого расчета. Вероятность точного попадания реального значения интенсивности изнашивания инструмента в представленную область составляет не менее 87,5 % при доверительной вероятности 95 %, что говорит о достаточной для практики точности. Суть разработанной в рамках данного исследования методики прогнозирования величины изнашивания режущей пластины заключается в выполнении пробного прохода резца с целью получения стружки, по толщине которой необходимо рассчитать величину интенсивности изнашивания и наиболее вероятной абсолютной погрешности по установленным зависимостям. В работе также определено, что зависимость интенсивности изнашивания имеет точку минимума. Это обстоятельство позволило установить значение минимальной возможной интенсивности изнашивания при обработке сплава ТН-1, а также погрешность расчета $\delta_{r_{\min}} = (0,432 \pm 0,096) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-2}$. Оптимальное значение толщины стружки $a = 0,34 \text{ мм}$. Наиболее близким из испытанных режимов, обеспечивающих сопоставимую интенсивность изнашивания режущей пластины, равную $0,475 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-2}$, является следующий: скорость резания 5 м/мин, подача 0,2 мм/об, глубина резания 0,3 мм. При этом толщина стружки составила 0,4 мм.

Для цитирования: Прогнозирование интенсивности изнашивания инструмента при обработке никелида титана ТН-1 / А.Г. Кисель, Н.М. Бобровский, Д.Б. Подашев, П.В. Целиков, Р.У. Каменов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 194–205. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-194-205.

Введение

Интенсивность изнашивания инструмента при изготовлении деталей в машиностроительном производстве является важным критерием оценки эффективности выбранной стратегии обработки. Малая интенсивность изнашивания говорит о том, что подобраны рациональные

*Адрес для переписки

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент,
Калининградский государственный технический университет,
Советский пр., 1,
236022, г. Калининград, Россия
Тел.: +7 999 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

условия обработки с точки зрения срока службы инструмента. Снижение интенсивности изнашивания приводит к снижению издержек производства, связанных с затратами на обрабатываемый инструмент, и к повышению производительности в целом [1]. Поэтому на производстве интенсивность изнашивания стремятся снижать различными способами:

- применением рациональных режимов резания [2–4];
- использованием инструментов из износостойких материалов, с рациональной геометрией и износостойкими покрытиями [2, 5–8];
- снижением температуры в зоне резания [9–13];
- физико-химическим воздействием на инструмент и заготовку с целью изменения их свойств до или во время обработки [14–18].

При этом интенсивность изнашивания зависит от многих параметров, вследствие чего она является переменной величиной даже при применении постоянных условий обработки. Несмотря на то что ее сложно предсказать, в данном направлении проводятся исследования [19]. В частности, прогнозировать интенсивность изнашивания инструментов (или период стойкости инструмента) можно следующими способами:

- на основе эмпирических зависимостей, введенных по результатам предварительных экспериментальных исследований [20–22];
- за счет применения искусственного интеллекта и машинного обучения [23, 24];
- путем экспериментального определения зависимости контролируемых факторов и интенсивности изнашивания для конкретных случаев обработки [25–27].

Недостатком первого способа является низкая точность по причине наличия таких случайных факторов, как состав и свойства материалов заготовки и режущего инструмента, покрытия режущего инструмента, свойства применяемого

станочного оборудования и смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Недостаток второго способа заключается в его дороговизне. Наиболее рациональным, принятым в данных исследованиях, является последний способ.

В качестве примера обрабатываемого материала был выбран никелид титана (нитинол) ТН-1 вследствие малой изученности его обрабатываемости и большой важности для такой отрасли, как аэрокосмическая промышленность и других, где требуются сплавы с эффектом памяти формы, которым обладает данный сплав. Принятым видом обработки являлось точение без СОЖ (для устранения влияния данного фактора, а также в связи с имеющейся практикой обработки на промышленных предприятиях).

Учитывая вышесказанное, была поставлена **цель исследований**: снижение интенсивности изнашивания инструмента при обработке никелида титана ТН-1. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- провести экспериментальные исследования интенсивности изнашивания инструмента при различных режимах обработки;
- выбрать параметр для анализа характера процесса обработки и определения его взаимосвязи с интенсивностью изнашивания инструмента;
- установить зависимость интенсивности изнашивания инструмента от выбранного параметра;
- разработать методику прогнозирования интенсивности изнашивания инструмента и рекомендации по выбору рационального режима обработки.

Методика исследований

Химический состав и свойства принятого для исследований материала представлены в табл. 1 и 2 соответственно [28–30].

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава ТН-1, стандартизированный ТУ 1-809-394-84 (масс. %)

Chemical composition of the TN-1 alloy, under TU 1-809-394-84 (% by weight)

| Ni | Ti | Примеси (не более) | | | | | | | Сумма других примесей (не более) |
|-------------|------|--------------------|-----|-----|------|------|-----|-------|----------------------------------|
| | | C | Co | Fe | Si | N | O | H | |
| 53,5...56,5 | Осн. | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,15 | 0,05 | 0,2 | 0,013 | 0,3 |

Таблица 2

Table 2

Механические свойства сплава ТН-1

Mechanical properties of the TN-1 alloy

| ρ , кг/м ³ | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | E , ГПа | HV | $T_{пл}$, °С | λ , Вт/(м·К) | c , Дж/(кг·К) |
|----------------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------|----------|---------------|----------------------|-----------------|
| 6450...6500 | 588 | 294 | >10 | 33 | 331 ± 42 | 1250...1310 | 8,6...18 | 456 |

Примером изделия аэрокосмической техники, в котором применяется сплав ТН-1, может служить клапан однократного действия, представленный на рис. 1 [31]. Принцип действия клапана состоит в восстановлении формы предварительно деформированного (сжатого) толкателя 5 при его нагреве, в результате чего хвостовик 8 разрывается в месте проточки, и рабочее тело (газ или жидкость) проходит через образовавшийся зазор в направлении штуцера 4.

По рис. 1 видно, что толкатели 5 представляют собой тела вращения. Следовательно, при их изготовлении применяется токарная обработка.

Оценка интенсивности изнашивания проводилась на настольном токарном станке модели УТС6 с компьютерной системой ЧПУ. Токарная обработка была выбрана как наиболее распространенная при изготовлении изделий из сплава ТН-1. В качестве режущего инструмента применялся резец с твердосплавными сменными режущими пластинами CCMT09T308-ЕМ с многослойным PVD-покрытием общей толщиной 4 мкм на основе AlTiN (алюмонитрид титана) (производство компании ZCC Cutting Tools, Китай). Материал используемых пластин – ультрамелкозернистый твердый сплав YBG205, состоящий из кобальта, карбидов вольфрама и кар-

бидов титана. Процентное содержание каждого компонента является коммерческой тайной фирмы-производителя. Данные режущие пластины предназначены для обработки следующих групп материалов с твердостью до 55 HRC: углеродистых и легированных сталей, коррозионно-стойких сталей, титановых и жаропрочных сплавов.

Геометрические параметры резца: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\phi = 90^\circ$, $\epsilon = 80^\circ$, $r = 0,4$ мм. Диаметр заготовки 10 мм.

Режимы резания при испытаниях были подобраны в соответствии с применяемыми на производстве при чистовой и получистовой обработке, а именно:

- скорость резания – от 5 до 30 м/мин;
- подача – от 0,03 до 0,2 мм/об;
- глубина резания – от 0,1 до 0,3 мм.

Следует отметить, что поскольку в задачи исследования не входило определение взаимосвязи параметров режима резания и интенсивности изнашивания режущей пластины, то для сокращения числа опытов было принято решение ограничиться только крайними уровнями варьирования факторов. При этом различные сочетания выбранных факторов обеспечат разные условия резания, а значит, и разные величины параметра, характеризующего процесс обработки. Это позволит построить график зависимости интенсивности изнашивания инструмента от выбранного параметра.

Таким образом, проводился полный трехфакторный эксперимент. В процессе испытаний контролируемым параметром являлся износ режущей пластины по задней поверхности, измерение которого выполнялось с помощью тарированного цифрового микроскопа. Предельным значением износа была принята величина 0,3 мм, так как она соответствует среднему

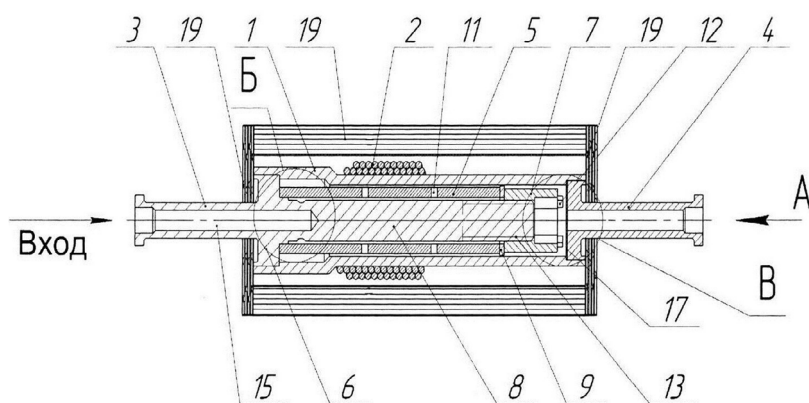


Рис. 1. Клапан однократного действия

Fig. 1. Single-acting valve

значению критерия износа при чистовой и получистой обработке. Поскольку величина принятого предельного значения износа существенно превышает толщину покрытия режущей пластины, то оценка стойкости проводилась для всего инструмента в целом, без учета степени влияния покрытия. В дальнейшем по полученным результатам определялась интенсивность изнашивания δ_V режущей пластины по объему удаленного с заготовки материала:

$$\delta_V = \frac{h_3}{V_{уд}}, \quad (1)$$

где h_3 – износ инструмента по задней поверхности, мм; $V_{уд}$ – объем удаленного материала заготовки, мм³.

Однако проведение стойкостных испытаний является достаточно трудоемким и ресурсозатратным, поэтому целесообразно вывести математическую зависимость, которая позволит прогнозировать интенсивность изнашивания по параметру, легко контролируемому при обработке и не требующему для его измерения дорогостоящего оборудования.

Одним из факторов, характеризующих процесс резания, может служить получаемая стружка. Ее основные параметры – толщина или ширина – в данной работе измерялись с помощью тарированного цифрового микроскопа.

При проведении исследований устанавливался один из принятых режимов обработки. После выполнения рабочего хода инструмента режущая пластина снималась с резца и проводилось измерение величины ее износа по задней

поверхности. У полученной при этом стружки измерялась толщина и ширина. Установленные величины заносились в таблицу, после чего пластина устанавливалась обратно на державку и выполнялся следующий проход. Испытания продолжались до достижения предельного износа, затем устанавливался другой режим резания.

Для повышения достоверности результатов исследований каждый опыт выполнялся по пять раз, после чего рассчитывались средние арифметические значения интенсивности изнашивания и параметров стружки, которые заносились в таблицу.

Результаты и их обсуждение

Полученные при испытаниях значения интенсивности изнашивания пластины и значения толщины a , мм, и ширины b , мм, стружки приведены в табл. 3.

На основе представленных данных были построены графики зависимостей $\delta_V = f(a)$ и $\delta_V = f(b)$, приведенные на рис. 2.

Оценка данных зависимостей с помощью средств MS Excel позволила установить величины достоверности аппроксимации, которая составила:

- 0,8653 для графика $\delta_V = f(a)$;
- 0,4943 для графика $\delta_V = f(b)$.

Таким образом, для прогнозирования величины интенсивности изнашивания целесообразно использовать первую зависимость $\delta_V = f(a)$, так как она обеспечивает большую точность рас-

Таблица 3

Table 3

Результаты испытаний

Test results

| № опыта | V , м/мин | S , мм/об | t , мм | δ_V , 10^{-3} мм ⁻² | a , мм | b , мм |
|---------|-------------|-------------|----------|---|----------|----------|
| 1 | 5 | 0,03 | 0,1 | 0,594 | 0,260 | 0,685 |
| 2 | 30 | 0,03 | 0,1 | 3,271 | 0,092 | 0,541 |
| 3 | 5 | 0,2 | 0,1 | 1,435 | 0,167 | 0,514 |
| 4 | 30 | 0,2 | 0,1 | 3,723 | 0,129 | 0,455 |
| 5 | 5 | 0,03 | 0,3 | 1,45 | 0,471 | 0,892 |
| 6 | 30 | 0,03 | 0,3 | 3,444 | 0,111 | 0,628 |
| 7 | 5 | 0,2 | 0,3 | 0,475 | 0,400 | 0,863 |
| 8 | 30 | 0,2 | 0,3 | 1,377 | 0,237 | 0,879 |

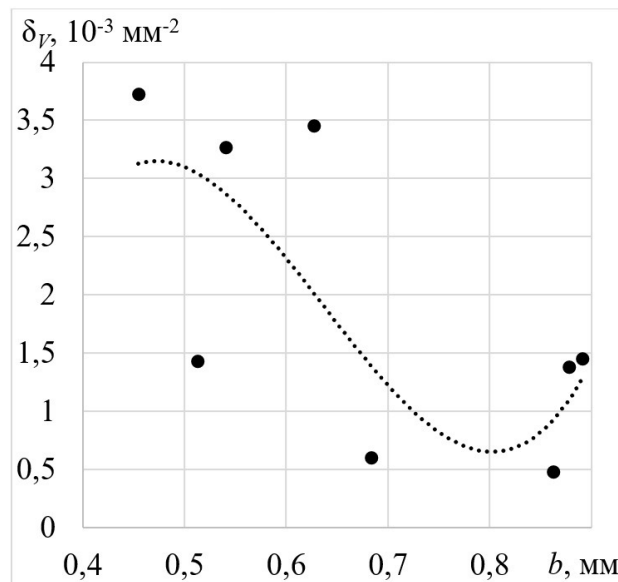
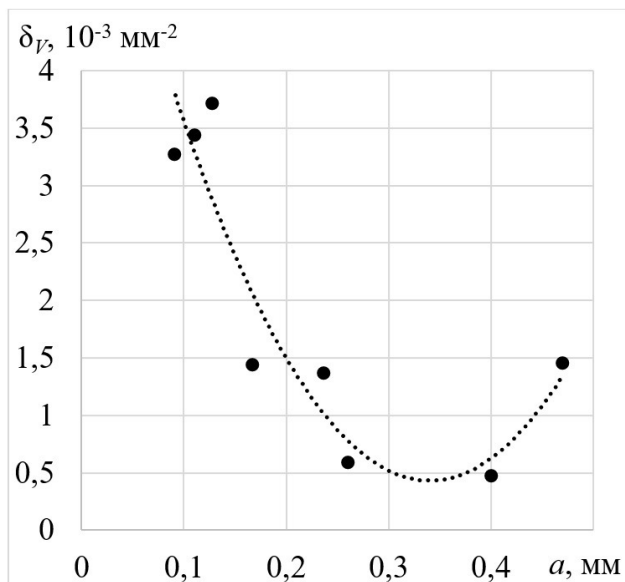


Рис. 2. Графики зависимостей $\delta_v = f(a)$ (а) и $\delta_v = f(b)$ (б)
Fig. 2. Dependence graphs $\delta_v = f(a)$ (а) and $\delta_v = f(b)$ (б)

четов. Установленная зависимость описывается следующей эмпирической формулой:

$$\delta_v = 54,0785a^2 - 36,8231a + 6,7004. \quad (2)$$

Для оценки величины погрешности расчетов в формулу (2) были подставлены измеренные ранее толщины стружки, посчитана интенсивность изнашивания и определена относительная погрешность ϵ по сравнению с экспериментальными данными. Полученные данные приведены в табл. 4.

Оценка результатов расчета показывает, что определение конкретной величины интенсив-

ности изнашивания по выведенной зависимости дает высокую погрешность – от 4,42 до 43,49 %. Это объясняется относительно малыми величинами измеряемых размеров стружки, малыми значениями интенсивности изнашивания и неоднородностью материалов инструмента и заготовки, что влияет на их свойства. Поэтому целесообразно установить не только зависимость интенсивности изнашивания, но и погрешность ее расчета по выведенной зависимости. С этой целью были определены абсолютные погрешности $\Delta\delta_v$, взятые по модулю, и построен график зависимости от величины толщины стружки.

Таблица 4
Table 4

Результаты расчетов интенсивности изнашивания
The results of calculations of the wear intensity

| № опыта | a , мм | $\delta_v(\text{эксп})$, 10^{-3} мм^{-2} | $\delta_v(\text{расч})$, 10^{-3} мм^{-2} | ϵ , % |
|---------|----------|---|---|----------------|
| 1 | 0,260 | 0,594 | 0,782 | 31,67 |
| 2 | 0,092 | 3,271 | 3,784 | 15,68 |
| 3 | 0,167 | 1,435 | 2,059 | 43,49 |
| 4 | 0,129 | 3,723 | 2,862 | –23,14 |
| 5 | 0,471 | 1,45 | 1,354 | –6,65 |
| 6 | 0,111 | 3,444 | 3,292 | –4,42 |
| 7 | 0,400 | 0,475 | 0,621 | 30,63 |
| 8 | 0,237 | 1,377 | 1,016 | –26,18 |

Полученная зависимость представлена на рис. 3. При этом точки, имеющие большое отклонение от построенной зависимости, были отброшены и не учитывались в расчете, как ошибочные.

Оценка полученной зависимости показала, что ее достоверность аппроксимации составляет 0,9697. Представленный на рис. 3 график описывается формулой

$$\Delta\delta_V = 11,179a^2 - 8,7612a + 1,7833. \quad (3)$$

Таким образом, итоговую зависимость для прогнозирования интенсивности изнашивания инструмента при обработке заготовки из никелида титана ТН-1 можно описать системой следующих уравнений:

$$\begin{cases} \delta_V = 54,0785a^2 - 36,8231a + 6,7004, \\ \Delta\delta_V = 11,179a^2 - 8,7612a + 1,7833. \end{cases} \quad (4)$$

Графически установленную систему уравнений можно представить в виде кривых, ограничивающих разброс значений интенсивности изнашивания режущей пластины резца при точении заготовки из никелида титана ТН-1 (рис. 4).

Оценка графика (рис. 3) путем сравнения с экспериментальными результатами показала, что вероятность точного попадания реального значения интенсивности изнашивания инструмента в представленную область составляет не менее 87,5 % при доверительной вероятности 95 %, что говорит о достаточной для практики точности.

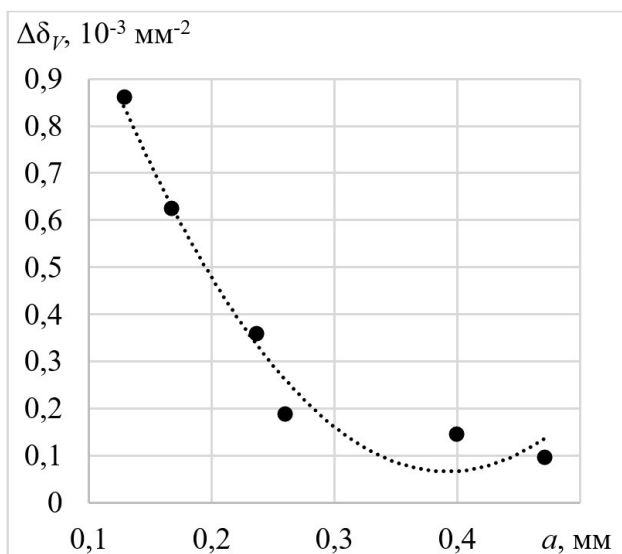


Рис. 3. График зависимости $\Delta\delta_V = f(a)$

Fig. 3. Dependency graph $\Delta\delta_V = f(a)$

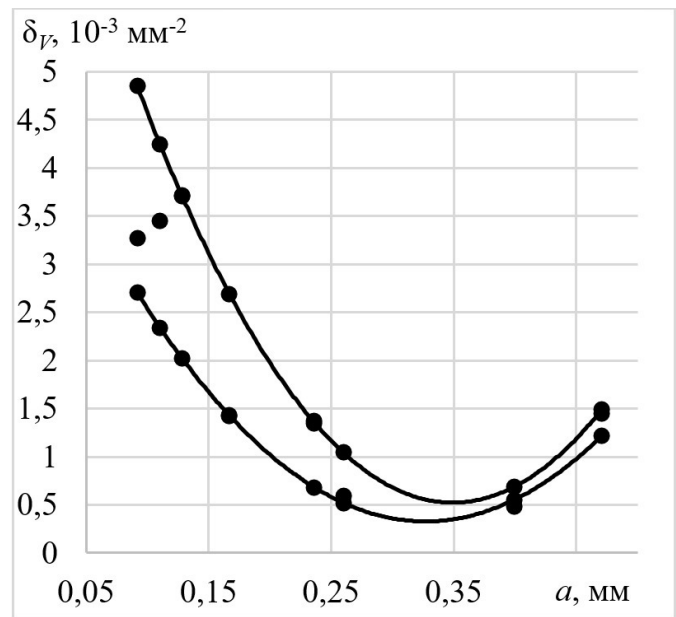


Рис. 4. Разброс значений интенсивности изнашивания инструмента при точении никелида титана ТН-1

Fig. 4. Variation in tool wear intensity during turning of titanium nickelide TN-1

Кроме того, очевидным является то, что зависимость интенсивности изнашивания имеет точку минимума. Это говорит о возможности нахождения оптимального значения или интервала оптимальных значений интенсивности изнашивания при известном максимально допустимом значении.

Для определения оптимального значения интенсивности изнашивания зависимость (2) была продифференцирована по величине толщины стружки a и приравнена к нулю. Решение уравнения позволило установить значение минимальной интенсивности изнашивания для описанного случая, а также погрешность расчета по выражению (3): $\delta_{V_{\min}} = (0,432 \pm 0,096) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$. При этом оптимальное значение $a = 0,34 \text{ мм}$.

Наиболее близким из испытанных режимов, обеспечивающих сопоставимую интенсивность изнашивания режущей пластины, равную $0,475 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$, является следующий: скорость резания 5 м/мин, подача 0,2 мм/об, глубина резания 0,3 мм. При этом толщина стружки составила 0,4 мм.

Резюмируя, можно описать методику прогнозирования интенсивности изнашивания инструмента при обработке никелида титана ТН-1 (либо аналогичных по свойствам сплавов) следующим образом. Прогнозирование величины

изнашивания режущей пластины заключается в выполнении пробного прохода резца с целью получения стружки, по толщине которой необходимо рассчитать величину интенсивности изнашивания и наиболее вероятной абсолютной погрешности по представленным выше зависимостям (4). Выполнение таких операций позволит существенно сократить время испытаний и затраты на режущий инструмент.

Следует также отметить, что выявленные зависимости интенсивности изнашивания инструмента в условиях точения без применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) коррелируют с современными тенденциями развития экологически безопасных технологий механической обработки (dry machining, MQL). Установленные закономерности могут быть использованы не только при выборе рациональных режимов резания, но и при формировании методологических основ моделирования процессов поверхностного пластического деформирования, в частности выглаживания. Это открывает возможности интеграции предложенного подхода с задачами прогнозирования свойств поверхностного слоя, включая шероховатость и износостойкость.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

- экспериментально установлены значения интенсивности изнашивания режущего инструмента при различных режимах точения заготовок из никелида титана ТН-1;
- для анализа характера процесса обработки выбрана толщина получаемой стружки, так как зависимость от этого параметра обеспечивает большую точность расчетов интенсивности изнашивания инструмента;
- установлена эмпирическая зависимость интенсивности изнашивания инструмента от толщины получаемой стружки. Зависимость имеет параболическую форму, что позволило определить точку минимума и значение минимальной возможной интенсивности изнашивания инструмента;
- разработана методика прогнозирования интенсивности изнашивания инструмента при обработке никелида титана ТН-1 по толщине

получаемой стружки. Рекомендуемый режим обработки: скорость резания 5 м/мин, подача 0,2 мм/об, глубина резания 0,3 мм.

Результаты исследования позволяют экстраполировать установленные режимы резания на другие виды лезвийной обработки никелида титана и его аналогов с учетом определенных допущений. Кроме того, морфология и параметры стружки являются диагностическим признаком, позволяющим оценить механические свойства обрабатываемого материала, такие как прочность и пластичность. Установленная корреляция свидетельствует о потенциале параметров стружки для прогнозирования поведения материала в процессах поверхностно-пластического деформирования (ППД). Следовательно, они могут быть использованы в качестве критерия для выбора рациональных режимов ППД, направленных на формирование заданных свойств поверхностного слоя. Учитывая также установленное влияние состояния поверхности после лезвийной обработки на последующие операции ППД [32], представленные результаты могут быть интегрированы в систему реверсивного моделирования GPS-характеристик при выглаживании. Данная интеграция обеспечивает преемственность и системность проводимых исследований.

Список литературы

1. Zhang G., Wang J. Tool wear mechanism and suppression in machining ferrous materials // Material-oriented cutting processes in precision machining. – Singapore: Springer, 2025. – P. 109–145. – (Springer tracts in mechanical engineering). – DOI: 10.1007/978-981-96-2504-8_5.
2. Фам Х. Ч., Чигиринский Ю. Л., Полянчиков Ю. Н. Методы снижения интенсивности изнашивания твердосплавного инструмента // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12-1. – С. 132–137.
3. Унянин А. Н., Финагеев П. Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 12 (150). – С. 23–29. – DOI: 10.30987/2223-4608-2023-23-29.
4. Optimization of cutting modes during machining of difficult-to-cut materials / Y. Kusyi, A. Kuk, N. Hryniv, Y. Danylo // New Technologies, Development and Application VIII (NT 2025). – Cham, Switzerland: Springer, 2025. – P. 451–458. – (Lecture Notes in

Networks and Systems; vol. 1482). – DOI: 10.1007/978-3-031-95194-7_46.

5. Чигиринский Ю.Л., Фам Х.Ч. Особенности механической обработки дуплексных коррозионно-стойких сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 5 (184). – С. 51–54.

6. Cutting-tool wear and hardening of high-speed steel by local electrospark coating application / V.N. Gadalog, R.E. Abashkin, Yu.V. Boldyrev, E.F. Balabaeva, A.I. Lytkin // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29 (4). – P. 419–422. – DOI: 10.3103/S1068798X09040200.

7. Влияние многослойных покрытий на основе циркония и титана на износостойкость твердосплавного инструмента при точении нержавеющей стали / Е.В. Фоминов, М.М. Алиев, Ю.А. Тороп, А.Е. Мироненко, А.В. Фоменко, А.А. Марченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 11 (215). – С. 494–496. – DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-11-494-496.

8. Study of the effect of microgeometry parameters of the cutting edge on cutting force, wear, and machinability during milling / A.S. Babaev, V.N. Kozlov, A.R. Semenov, A.S. Shevchuk, V.A. Ovcharenko // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44 (12). – P. 1756–1766. – DOI: 10.3103/S1068798X24703271.

9. Дубров Д.Ю. Снижение интенсивности размерного износа режущих инструментов // Вестник Евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 5. – Ст. 73.

10. Кирейнов А.В., Есов В.Б. Влияние полусинтетической СОЖ с металлоорганическими присадками на износ твердосплавного инструмента при точении коррозионностойкой стали 12X18H10T // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 5 (331). – С. 70–73.

11. Performance of cutting fluids with nanoparticles in the Ti5553 alloy turning process using high-speed cutting / R.G. Dos Santos, J.M.F. De Paiva, R.D. Torres, F.L. Amorim // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 136 (10). – P. 4623–4645. – DOI: 10.1007/s00170-025-15126-5.

12. Nelson N., Nair A.R. The coupling of heat transfer between tool–chip–workpiece interfaces and the wear rate while applying nanofluids as cutting fluids in MQCL-assisted machining: a comprehensive review // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2025. – Vol. 150. – P. 9743–9774. – DOI: 10.1007/s10973-025-14400-8.

13. Cutting performance and machining economy of the hard cutting tools in clean cutting of hardened H13 steel / Ch. Jing, G. Zheng, X. Cheng, Yu. Cui, H. Liu, H. Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 130 (11–12). – P. 5165–5179. – DOI: 10.1007/s00170-024-13012-0.

14. Ковалевский С.В., Ковалевская Е.С., Кошевой А.О. Высоковольтный разряд как фактор повышения режущих свойств неперетачиваемых пластин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-6-17.

15. Математическая модель процесса точения с использованием вибрационного воздействия на режущий инструмент / А.Н. Синько, Т.Ю. Никоннова, В.В. Юрченко, А.К. Матешов, И.А. Марченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 2-1 (48). – С. 216–222. – DOI: 10.37220/MIT.2020.48.2.045.

16. Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании опережающего пластического деформирования / А.А. Бондарев, Я.Н. Отений, Ю.Н. Полянчиков, Д.В. Крайнев // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 3 (57). – С. 40–44.

17. Амбросимов С.К. Снижение сил резания при опережающем пластическом деформировании металлов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 7 (68). – С. 13–18. – DOI: 10.30987/article_5ba8a1865b1200.15607548.

18. Kupczyk M.J. The use of the addition of Cr₃C₂ in nanocrystalline sintered carbides to create a composite tool material with better operational properties // Materials Design And Applications V. – Cham, Switzerland: Springer, 2024. – P. 3–14. – (Advanced Structured Materials; vol. 212). – DOI: 10.1007/978-3-031-73906-4_1.

19. Predicting cutting tool life: models, modelling, and monitoring / S. Khadka, R.A. Rahman Rashid, G. Stephens, A. Papageorgiou, J. Navarro-Devia, S. Hägglund, S. Palanisamy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 136 (7–8). – P. 3037–3076. – DOI: 10.1007/s00170-024-14961-2.

20. Thakur R., Sahu N.K., Shukla R.K. Parametric optimization of dry turning for improved machining of duplex stainless steel (DSS2205) using response surface methodology (RSM) and design of experiments (DOE) // Sadhana. – 2025. – Vol. 50 (1). – P. 2. – DOI: 10.1007/s12046-024-02649-y.

21. Vagaská A., Gombár M., Panda A. Application of mathematical programming methods in optimization of cutting conditions in machining processes // Optimization Methods in Mathematical Modeling of Technological Processes. – Cham, Switzerland: Springer, 2023. – P. 95–127. – (Mathematical Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-031-35339-0_6.

22. Kolocheva V.V., Boridko N.V. Methodology for assessing the competitiveness of metal-cutting tools // Ecological Footprint of the Modern Economy and the Ways to Reduce It. – Cham, Switzerland: Springer,

2024. – P. 251–256. – (Advances in Science, Technology & Innovation). – DOI: 10.1007/978-3-031-49711-7_42.

23. Bayesian neural networks modeling for tool wear prediction in milling Al 6061 T6 under MQL conditions / J. Airao, A. Gupta, Ch.K. Nirala, A.W.J. Hsue // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 135 (5–6). – P. 2777–2788. – DOI: 10.1007/s00170-024-14678-2.

24. Lapshin V.P., Turkin I.A., Dudinov I.O. Compilation of a set of informative features for neural network-based determination of minimum vibration of cutting tools // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44 (9). – P. 1356–1362. – DOI: 10.3103/S1068798X24702101.

25. Mokriskij B.Y., Morozova A.V. Controlling the parameters of the cutting technological system by the dissipative structures state // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. – Cham, Switzerland: Springer, 2023. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_91.

26. Experimental Investigation of tool lifespan evolution during turning operation based on the new spectral indicator OL_{mod} / M.Kh. Babouri, N. Ouelaa, M.Ch. Djamaa, Z. Ouelaa, L. Chaabi, A. Djebala // Journal of Vibration Engineering and Technologies. – 2024. – Vol. 12. – P. 5455–5473. – DOI: 10.1007/s42417-023-01175-1.

27. Optimization of cutting modes during sustainable machining of products based on economic criteria / Y. Kusyi, O. Kostiuk, A. Kuk, A. Attanasio,

P. Cocca // Advanced Manufacturing Processes V (Inter-Partner 2023). – Cham, Switzerland: Springer, 2024. – P. 167–181. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_16.

28. Володько С.С. Разработка технологии получения компактных заготовок из порошковых интерметаллидов TiNi и (Ti,Hf)Ni на основе гидридно-кальциевого синтеза: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2022. – 110 с.

29. Карелин Р.Д. Формирование структуры и функциональных свойств никелида титана на основе квазинепрерывной интенсивной пластической деформации в цикле Р.К.У.П. и ротационнойковки: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 129 с.

30. Метод количественного описания зависимости модуля Юнга никелида титана от температуры / И.Н. Андронов, Н.П. Богданов, Н.А. Северова, А.В. Тарсин // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – № 3 (15). – С. 87–90.

31. 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. Каташов, В.А. Панфилов; заявитель Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «Факел».

32. Makhalov M.S., Blumenstein V.Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration // Solid State Phenomena. – 2022. – Vol. 328. – P. 27–37. – DOI: 10.4028/p-z92o0e.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Prediction of tool wear intensity during machining of titanium nickelide TN-1

Anton Kisel'^{1, 2, a, *}, Nikolaj Bobrovskij^{1, 3, b}, Dmitriy Podashev^{2, c}, Pavel Tselikov^{2, d}, Renat Kamenov^{1, 3, e}

¹ National Research University of Electronic Technology (MIET), 1 Shokin Square, Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

² Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

³ Togliatti State University, 14 Belorusskaya st., Togliatti, 445020, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8014-0550>, kisel1988@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-9299-2822>, bobrnm@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>, dbp90@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>, patersort@list.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>, renatkamenov@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 September 2025

Revised: 25 September 2025

Accepted: 11 November 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Titanium Nickelide

Chip

Wear intensity

Shrinkage coefficient

Tool

Prediction

Funding

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00298-P, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00298/>

ABSTRACT

Introduction. One of the crucial criteria for evaluating the effectiveness of the chosen strategy for machining blanks is the tool wear intensity. Reducing the intensity of tool wear leads to a reduction in production costs related to cutting tool expenditures and an improvement in overall productivity. **The purpose of this work** is to reduce tool wear intensity during the machining of a blank manufactured from the shape memory alloy titanium nickelide *TN-1*. **Methods.** As part of this research, a complete three-factor turning experiment was conducted on the alloy blank to determine the cutting insert wear intensity over a wide range of cutting conditions. During the tests, the geometric parameters of the resulting chips, specifically thickness and width, were measured. By constructing graphs representing the dependencies of the chip parameters, approximating these dependencies, and assessing the reliability of each approximation, a key parameter was identified for developing a methodology to predict tool wear intensity. **Results and discussion.** The study demonstrates that for predicting the cutting insert wear intensity when turning a titanium nickelide *TN-1* blank, it is advisable to use the dependency on the resulting chip thickness. The established mathematical dependency is described by a system of equations that allows for the determination of the cutting insert wear intensity and the calculation error. The probability of accurately predicting the true value of tool wear intensity within the specified range is at least 87.5% at a 95% confidence level, which indicates sufficient practical accuracy. The essence of the methodology developed within this study for predicting the cutting insert wear magnitude lies in performing a test cut to obtain a chip whose thickness is then used to calculate the wear intensity magnitude and the most probable absolute error based on the established dependencies. Additionally, the study establishes that the wear intensity dependency exhibits a minimum point. This circumstance allowed for the establishment of the minimal possible wear intensity during *TN-1* alloy machining, as well as the associated calculation error: $\delta_{\text{Ymin}} = (0.432 \pm \pm 0.096) \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$. For an optimal chip thickness of $a = 0.34 \text{ mm}$, the closest tested mode yielding a comparable wear intensity of $0.475 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$ is: cutting speed 5 m/min, feed rate 0.2 mm/rev, depth of cut 0.3 mm. The chip thickness for this mode was 0.4 mm.

For citation: Kisel' A.G., Bobrovskij N.M., Podashev D.B., Tselikov P.V., Kamenov R.U. Prediction of tool wear intensity during machining of titanium nickelide TN-1. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 194–205. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-194-205. (In Russian).

References

1. Zhang G., Wang J. Tool wear mechanism and suppression in machining ferrous materials. *Material-oriented cutting processes in precision machining. Springer Tracts in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2025, pp. 109–145. DOI: 10.1007/978-981-96-2504-8_5.
2. Pham H.T., Tchigirinskiy Yu.L., Polyanchikov Yu.N. Metody snizheniya intensivnosti iznashivaniya tverdosplavnogo instrumenta [Methods of intensity decreasing of hard alloy tool wear]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2017, no. 12-1, pp. 132–137. (In Russian).

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Kaliningrad State Technical University,
 1 Sovetsky Prospekt,
 236022, Kaliningrad, Russian Federation
Tel.: +7 (999) 458-08-25, **e-mail:** kisel1988@mail.ru

3. Unyanin A.N., Finageev P.R. Issledovanie effektivnosti metodiki korrektsii rezhima protsessa mekhanicheskoi obrabotki s izmenyayushchimisya vo vremeni parametrami v usloviyakh neopredelennosti tekhnologicheskoi informatsii [Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2023, no. 12 (150), pp. 23–29. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-23-29.
4. Kusyi Y., Kuk A., Hryniv N., Danylo Y. Optimization of cutting modes during machining of difficult-to-cut materials. *New Technologies, Development and Application VIII (NT 2025). Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, Switzerland, Springer, 2025, vol. 1482, pp. 451–458. DOI: 10.1007/978-3-031-95194-7_46.
5. Chigirinskii Yu.L., Pham H.T. Osobennosti mekhanicheskoi obrabotki dupleksnykh korrozionnostoikikh stalei [Features of mechanical processing of duplex corrosion-resistant steels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia Volgograd State Technical University*, 2016, no. 5 (184), pp. 51–54.
6. Gadalov V.N., Abashkin R.E., Boldyrev Yu.V., Balabaeva E.F., Lytkin A.I. Cutting-tool wear and hardening of high-speed steel by local electrospark coating application. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29 (4), pp. 419–422. DOI: 10.3103/S1068798X09040200.
7. Fominov E.V., Aliev M.M., Torop Yu.A., Mironenko A.E., Fomenko A.V., Marchenko A.A. Vliyanie mnogosloinykh pokrytii na osnove tsirkoniya i titana na iznosostoikost' tverdospavnogo instrumenta pri tochenii nerzhavayushchei stali [Effect of multilayer coatings based on zirconium and titanium on wear resistance of carbide tools during turning of stainless steel]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2022, vol. 18, no. 11 (215), pp. 494–496. DOI: 10.36652/1813-1336-2022-18-11-494-496.
8. Babaev A.S., Kozlov V.N., Semenov A.R., Shevchuk A.S., Ovcharenko V.A. Study of the effect of microgeometry parameters of the cutting edge on cutting force, wear, and machinability during milling. *Russian Engineering Research*, 2024, vol. 44 (12), pp. 1756–1766. DOI: 10.3103/S1068798X24703271.
9. Dubrov D.Yu. Snizhenie intensivnosti razmernogo iznosa rezhushchikh instrumentov [Reducing the intensity of dimensional wear of cutting tools]. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*, 2018, vol. 10, no. 5, art. 73.
10. Kireinov A.V., Esov V.B. Vliyanie polusinteticheskoi SOZh s metalloorganicheskimi prisadkami na iznos tverdospavnogo instrumenta pri tochenii korrozionnostoikoi stali 12Kh18N10T [The influence of semi-synthetic cutting fluid with organometallic additives on tool wear in turning of stainless steel 12H18N10T]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2018, no. 5 (331), pp. 70–73.
11. Dos Santos R.G., De Paiva J.M.F., Torres R.D., Amorim F.L. Performance of cutting fluids with nanoparticles in the Ti5553 alloy turning process using high-speed cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 136 (10), pp. 4623–4645. DOI: 10.1007/s00170-025-15126-5.
12. Nelson N., Nair A.R. The coupling of heat transfer between tool–chip–workpiece interfaces and the wear rate while applying nanofluids as cutting fluids in MQCL-assisted machining: a comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2025, vol. 150, pp. 9743–9774. DOI: 10.1007/s10973-025-14400-8.
13. Jing Ch., Zheng G., Cheng X., Cui Yu., Liu H., Zhang H. Cutting performance and machining economy of the hard cutting tools in clean cutting of hardened H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 130 (11–12), pp. 5165–5179. DOI: 10.1007/s00170-024-13012-0.
14. Kovalevskyy S.V., Kovalevska O.S., Koshovii A.O. Vysokovol'tnyi razryad kak faktor povysheniya rezhushchikh svoystv neperetachivaemykh plastin [High-voltage discharge as a factor of increasing the cutting properties of disposable inserts]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-6-17. (In Russian).
15. Sin'ko A.N., Nikonova T.Yu., Yurchenko V.V., Mateshov A.K., Marchenko I.A. Matematicheskaya model' protsessa tocheniya s ispol'zovaniem vibratsionnogo vozdeistviya na rezhushchii instrument [Mathematical model of the turning process using vibration impact on the cutting tool]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2020, no. 2-1 (48), pp. 216–222. DOI: 10.37220/MIT.2020.48.2.045.
16. Bondarev A.A., Otenii Ya.N., Polyanchikov Yu.N., Krainev D.V. Snizhenie temperaturno-silovoi napryazhennosti protsessa rezaniya pri ispol'zovanii operezhayushchego plasticheskogo deformirovaniya [Reducing the temperature-force stress of the cutting process using advanced plastic deformation]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 3 (57), pp. 40–44.
17. Ambrosimov S.K. Snizhenie sil rezaniya pri operezhayushchem plasticheskom deformirovanii metallov [Cutting force decrease at leading metal plastic deformation]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2018, no. 7 (68), pp. 13–18. DOI: 10.30987/article_5ba8a1865b1200.15607548.

18. Kupczyk M.J. The use of the addition of Cr_3C_2 in nanocrystalline sintered carbides to create a composite tool material with better operational properties. *Materials Design And Applications V. Advanced Structured Materials*. Cham, Switzerland, Springer, 2024, vol. 212, pp. 3–14. DOI: 10.1007/978-3-031-73906-4_1.
19. Khadka S., Rahman Rashid R.A., Stephens G., Papageorgiou A., Navarro-Devia J., Hägglund S., Palanisamy S. Predicting cutting tool life: models, modelling, and monitoring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 136 (7–8), pp. 3037–3076. DOI: 10.1007/s00170-024-14961-2.
20. Thakur R., Sahu N.K., Shukla R.K. Parametric optimization of dry turning for improved machining of duplex stainless steel (DSS2205) using response surface methodology (RSM) and design of experiments (DOE). *Sadhana*, 2025, vol. 50 (1), p. 2. DOI: 10.1007/s12046-024-02649-y.
21. Vagaská A., Gombár M., Panda A. Application of mathematical programming methods in optimization of cutting conditions in machining processes. *Optimization Methods in Mathematical Modeling of Technological Processes. Mathematical Engineering*. Cham, Switzerland, Springer, 2023, pp. 95–127. DOI: 10.1007/978-3-031-35339-0_6.
22. Kolocheva V.V., Boridko N.V. Methodology for assessing the competitiveness of metal-cutting tools. *Ecological Footprint of the Modern Economy and the Ways to Reduce It. Advances in Science, Technology & Innovation*. Cham, Switzerland, Springer, 2024, pp. 251–256. DOI: 10.1007/978-3-031-49711-7_42.
23. Airao J., Gupta A., Nirala Ch.K., Hsue A.W.J. Bayesian neural networks modeling for tool wear prediction in milling Al 6061 T6 under MQL conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 135 (5–6), pp. 2777–2788. DOI: 10.1007/s00170-024-14678-2.
24. Lapshin V.P., Turkin I.A., Dudinov I.O. Compilation of a set of informative features for neural network-based determination of minimum vibration of cutting tools. *Russian Engineering Research*, 2024, vol. 44 (9), pp. 1356–1362. DOI: 10.3103/S1068798X24702101.
25. Mokriskij B.Y., Morozova A.V. Controlling the parameters of the cutting technological system by the dissipative structures state. *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Switzerland, Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-14125-6_91.
26. Babouri M.Kh., Ouelaa N., Djamaa M.Ch., Ouelaa Z., Chaabi L., Djebala A. Experimental Investigation of tool lifespan evolution during turning operation based on the new spectral indicator OL_{mod} . *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 2024, vol. 12, pp. 5455–5473. DOI: 10.1007/s42417-023-01175-1.
27. Kusyi Y., Kostiuk O., Kuk A., Attanasio A., Cocca P. Optimization of cutting modes during sustainable machining of products based on economic criteria. *Advanced Manufacturing Processes V (InterPartner 2023). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, Switzerland, Springer, 2024, pp. 167–181. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_16.
28. Volod'ko S.S. *Razrabotka tekhnologii polucheniya kompaktnykh zagotovok iz poroshkovykh intermetallidov TiNi i (Ti,Hf)Ni na osnove gidridno-kal'tsievogo sinteza*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a technology for producing compact blanks from powdered intermetallic compounds TiNi and (Ti,Hf)Ni based on calcium hydride synthesis. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2022. 110 p.
29. Karelin R.D. *Formirovanie struktury i funktsional'nykh svoystv nikelida titana na osnove kvazinepreryvnoi intensivnoi plasticheskoi deformatsii v tsikle R.K.U.P. i rotatsionnoi kovki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Formation of the structure and functional properties of titanium nickelide based on quasi-continuous intense plastic deformation in the R.K.U.P. cycle and rotational forging. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2021. 129 p.
30. Andronov I.N., Bogdanov N.P., Severova N.A., Tarsin A.V. Metod kolichestvennogo opisaniya zavisimosti modulya Yunga nikelida titana ot temperatury [Method of quantitative description of temperature dependence of NiTi Young's modulus]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre Ural Branch Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 3 (15), pp. 87–90.
31. Vertakov N.M., Grechushnikov V.A., Katashov A.V., Panfilov V.A. *Klapan odnokratnogo deistviya vysokogo davleniya* [Single-action high-pressure valve]. Patent RF, no. 2821357, 2024.
32. Makhalov M.S., Blumenstein V.Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. *Solid State Phenomena*, 2022, vol. 328, pp. 27–37. DOI: 10.4028/p-z92o0e.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.