



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование температуры при обработке никелида титана ТН-1

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

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

² Тольяттинский государственный университет, ул. Белорусская, 14, г. Тольятти, Самарская обл., 445020, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Советский пр., 1, г. Калининград, 236022, Россия

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

^c <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>, renatkamenov@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>, dmitrij.podashev@klgtu.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>, patersort@list.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0003-2113-2192>, k.kisel-ks@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.941.1:621.787

История статьи:

Поступила: 05 марта 2026

Рецензирование: 30 мая 2026

Принята к печати: 11 июля 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Механическая обработка

Никелид титана (титинол)

Температура резания

Тепловизор

Режим обработки

Скорость резания

Подача

Глубина резания

Технологическая наследственность

Поверхностное пластическое деформирование

Финансирование

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Температура, возникающая в зоне обработки заготовок, является важным параметром, влияющим на точность получаемых размеров, качество поверхности, свойства материала детали и износостойкость инструмента. Особенно критична температура при обработке ответственных деталей различной техники, работающей в тяжелых условиях эксплуатации. Такие детали изготавливают из жаропрочных сплавов, примером которых является никелид титана. Повлиять на температуру можно разными способами, но самым первым, который и применялся в настоящей работе, считается выбор рациональных режимов обработки. **Цель данной работы:** оценка влияния параметров режима резания на возникающую температуру при обработке заготовок из никелида титана. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились по токарной обработке заготовок из никелида титана ТН-1. При испытаниях варьировались были параметры режима резания: скорость резания V , м/мин, подача S , мм/об, и глубина резания t , мм. Измерение возникающей при обработке температуры T , °С, выполнялось с помощью тепловизора СЕМ модели DT-9897. При испытаниях проводилась видеозапись процесса обработки, которая затем просматривалась с целью определения наибольшей величины температуры резания. Данная величина принималась как средняя температура резания, поскольку ее максимальное значение возникает в месте контакта стружки с передней поверхностью заготовки, которое закрыто от наблюдений самой стружкой. **Результаты и обсуждение.** При выполнении исследований достигнуты следующие результаты: согласно разработанному плану проведены экспериментальные исследования и определены величины температуры резания, возникающей при разных режимах точения заготовок из никелида титана ТН-1; установлены математические зависимости температуры от параметров режима резания; проведена верификация полученных зависимостей путем сравнения рассчитанных значений температуры резания с экспериментальными; установлено, что по выведенным зависимостям погрешность расчета не превышает 5,8 %; определены рациональные режимы точения заготовок из никелида титана по температуре резания и разработаны рекомендации по выбору параметров режима для чистовой и получистовой обработки.

Для цитирования: Исследование температуры при обработке никелида титана ТН-1 / Н.М. Бобровский, А.Г. Кисель, Р.У. Каменов, Д.Б. Подашев, П.В. Целиков, К.Х. Кисель // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 58–69. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-58-69.

Введение

При изготовлении деталей техники, которая работает в тяжелых условиях эксплуатации, применяют материалы с высокими механическими и технологическими характеристиками. К такой технике относят авиационную, ракетно-космическую, горнодобывающую и др. Для изготовления ответственных деталей при этом

* Corresponding author

Кисель Антон Геннадьевич, к.т.н., доцент, с.н.с.

Тольяттинский государственный университет,

ул. Белорусская, 14,

445020, Самарская обл., г. Тольятти, Россия

Тел.: +7 999 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

часто используют труднообрабатываемые жаропрочные сплавы, содержащие никель и титан. Механическая обработка при производстве деталей в данном случае сопровождается высокими силами и температурами, воздействующими на инструмент и заготовку, что негативно влияет на точность, качество поверхности, свойства материала детали и износостойкость инструмента [1–5]. Все это в конечном счете приводит к увеличению брака, повышенному расходу инструмента и росту себестоимости производства в целом. Способов снижения влияния негативных факторов несколько, но самым первым является выбор рациональных режимов обработки. Во многих исследованиях в качестве контролируемого параметра при определении рациональных режимов выступает температура, возникающая в зоне обработки. Это объясняется тем, что температура влияет на все упомянутые ранее параметры инструмента и готовой детали.

Существует несколько способов определения температуры в зоне обработки:

- применение моделирования обработки с помощью CAE-систем [1, 2, 6–8];
- применение искусственных, полусинтетических или естественных термопар [2, 3, 6, 7, 9–12];
- расчет по физическим или эмпирическим зависимостям [4, 9, 13, 14];
- измерение уровня инфракрасного излучения с помощью пирометров или тепловизоров [4, 11, 15–20].

У каждого способа есть свои достоинства и недостатки. При этом все большее распространение получают бесконтактные методы, так как они универсальны, позволяют на расстоянии оценивать распределение температур в наблюдаемой области в реальном времени и просты в эксплуатации. По этим причинам в настоящем исследовании измерения проводились с помощью тепловизора.

Примером труднообрабатываемых сплавов, применяемых в авиационной, ракетно-космической и другой технике, является никелид титана, также называемый нитинолом [21–23]. Особенность этого сплава состоит в эффекте памяти формы – способности восстанавливать форму после предварительной деформации в холодном состоянии при изменении температуры или других условий [24, 25].

В литературе имеются некоторые рекомендации по обработке заготовок из данного типа сплавов и закономерности изменения показателей качества при различных режимах, однако таких публикаций крайне мало и они не характеризуют в полной мере происходящие процессы.

В частности, в источнике [26] сравниваются традиционная лезвийная обработка заготовок из нитинола, лазерная обработка, электроэрозионная, химическая и лезвийная микрообработка. Приводится оценка влияния параметров режима обработки и смазочно-охлаждающей жидкости на формирование заусенцев, свойства получаемой поверхности, температуру фазового перехода. Показано, что процесс отделения материала при микрообработке менее энергозатратен, вызывает выделение меньшего количества теплоты, что позволяет применять более высокие параметры режима (подачу и скорость резания).

В работе [27] представлены исследования зависимости скорости удаления материала, периода стойкости инструмента и шероховатости получаемой поверхности от частоты вращения шпинделя, подачи и глубины резания при точении заготовки из нитинола. Установлены оптимальные параметры режима обработки для минимизации негативных факторов.

В источнике [28] рассмотрены различные способы математического описания взаимосвязи силы резания и шероховатости получаемой поверхности от параметров режима и мощности лазера при токарной обработке заготовок из нитинола с предварительным нагревом зоны резания с помощью лазера. Показано, что применение адаптивной нейронечеткой системы вывода (ANFIS) обеспечивает наибольшую точность прогнозирования. Установлено, что скорость резания является основным фактором, определяющим возникающую силу резания и получаемую шероховатость поверхности.

В статье [29] показаны результаты исследований влияния параметров режима токарной обработки заготовки из нитинола на скорость съема материала, износ инструмента и шероховатость поверхности. Установлен оптимальный режим обработки для обеспечения наибольшей эффективности по указанным показателям.

Работа [30] представляет собой обзорную статью о высокоскоростном микрофрезеровании заготовок из нитинола. Представлены про-

блемы, возникающие при обработке, и возможные направления дальнейших исследований – перспективные материалы инструмента, альтернативные лезвийным виды обработки, пути оптимизации режимов, методы постобработки и влияние на окружающую среду.

В источнике [31] рассмотрено влияние режимов на скорость удаления материала и шероховатость получаемой поверхности заготовки из нитинола при проволочной электроэрозионной обработке. Сделан вывод, что модель ANFIS дает более точный результат при прогнозировании параметров электроэрозионной обработки. При этом реализация метода ANFIS может быть сложной и требовать значительных вычислительных ресурсов.

Исследования, в которых была бы упомянута возникающая в процессе механической обработки нитинола температура, при поиске научных источников не были установлены. Поэтому **целью настоящей работы** является оценка влияния параметров режима резания на возникающую температуру при обработке заготовок из никелида титана. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- выполнить экспериментальные исследования по определению возникающей при разных режимах температуры резания;
- установить математические зависимости температуры от параметров режима резания;
- провести верификацию полученных зависимостей путем сравнения рассчитанных значений температуры резания с экспериментальными;
- установить рациональные режимы обработки никелида титана по температуре резания и разработать рекомендации по выбору параметров режима резания.

Методика исследований

Поскольку токарная обработка является одним из наиболее часто применяемых видов механической обработки, она выбрана для проведения исследований. Эксперименты выполнялись на настольном токарном станке с ЧПУ модели УТС6.

В качестве материала заготовки был выбран сплав ТН-1 как один из распространенных сплавов с памятью формы, применяемых в машиностроении. Основными химическими компонента-

ми этого сплава являются никель (53,5...56,5 % по массе) и титан (42,2...45,2 % по массе). Примером изделий из ТН-1 может послужить муфта для термомеханического соединения трубок (рис. 1). Заготовки имели диаметр 10 мм.

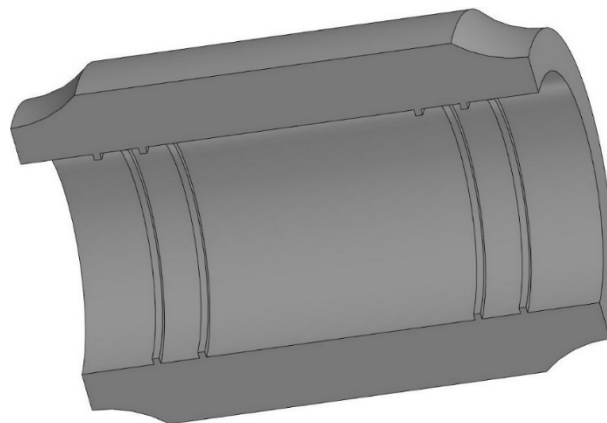


Рис. 1. Муфта для термомеханического соединения трубок из сплава с памятью формы в разрезе

Fig. 1. Coupling for thermomechanical joining of shape memory alloy tubes – sectional view

Применявшийся режущий инструмент – токарный резец ССМТ09Т308-ЕМ со сменной твердосплавной режущей пластиной с покрытием PVD на основе AlTiN.

При испытаниях варьируемыми были параметры режима резания: скорость резания V , м/мин, подача S , мм/об, и глубина резания t , мм. С целью оценки характера изменения искомой функции в центр плана при каждой глубине резания добавлена одна точка. Применявшиеся в исследованиях режимы аналогичны используемым на машиностроительных предприятиях (табл. 1).

Измерение возникающей при обработке температуры T , °C, выполнялось с помощью тепловизора СЕМ модели DT-9897 (рис. 2).

Диапазон измеряемых этим тепловизором температур: $-20...+650$ °C. Погрешность измерений согласно паспортным данным составляет ± 2 %. Коэффициент излучения ϵ регулируемый, что дает возможность устанавливать его в зависимости от характеристик рассматриваемой поверхности. Оценка данных, указанных в открытых интернет-источниках, показала, что ϵ для полированных или хорошо отражающих свет поверхностей различных сплавов может принимать значения от 0,1 до 0,3. Проверочный калибровочный эксперимент позволил уточнить

Таблица 1

Table 1

План экспериментов

Experiments plan

№ эксп.	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
9	17,5	0,115	0,1
10	17,5	0,115	0,3

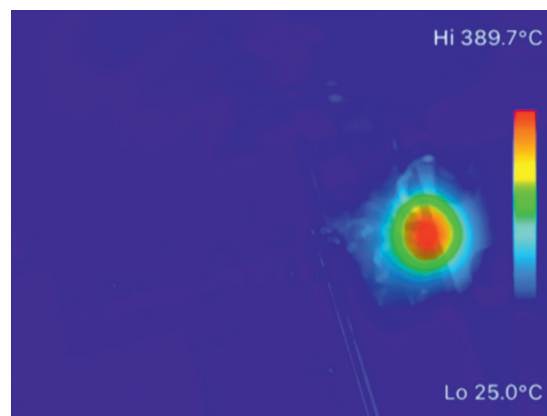
Рис. 2. Тепловизор
CEM DT-9897Fig. 2. Thermal imager
CEM DT-9897

эту величину, и для изучаемого материала было установлено $\varepsilon = 0,19$, что соответствует неокисленным никелевым сплавам. Измерение температуры T , °С, проводилось на расстоянии 500 мм от зоны обработки. Тепловизор направлялся на зону резания под углом 30...35° так, что в область съемки попадали рабочая часть резца, обрабатываемая заготовка и частично трехкулачковый патрон. Смазочно-охлаждающая жидкость в зону резания не подавалась в связи с имеющейся практикой на предприятиях. Кроме того, это позволяет снизить число влияющих факторов.

Поскольку наблюдаемый процесс не являлся установившимся (стружка отделялась от заготовки и перемещалась непредсказуемо), это вносило свою погрешность в результаты наблюдений. Вследствие этого температура сначала возрастала, а затем колебалась относительно некоторого установившегося значения в меньшую сторону. Поэтому было принято решение выполнять видеозапись процесса, а после эксперимента просматривать ее и записывать в качестве результата наблюдений наибольшую величину температуры резания. Эта величина принималась как средняя температура резания, поскольку ее максимальное значение возникает в месте контакта стружки с передней поверхностью заготовки, которое закрыто от наблюдений самой стружкой.

Каждый эксперимент проводился следующим образом. На станке резец с неизношенной режущей пластиной подводился в начальное положение. Включалась видеозапись на тепловизоре. Станок запускался на обработку по программе с необходимыми режимами резания. После выполнения обработки станок останавливался, выключалась видеозапись на тепловизоре. Применявшаяся режущая пластина снималась и устанавливалась новая. Затем все действия повторялись для каждого из рассматриваемых режимов обработки. Полученные во время проведения опытов видеозаписи просматривались с целью установить максимальную возникавшую температуру, которая записывалась в таблицу.

Пример изображения, полученного при испытаниях, представлен на рис. 3.

Рис. 3. Пример изображения, полученного
с помощью тепловизораFig. 3. Example of an image obtained with
a thermal imager

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных измерений температуры резания T представлены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты экспериментов

Experimental results

№ эксп.	V , м/мин	S , мм/об	t , мм	T , °C
1	5	0,03	0,1	183,4
2	30	0,03	0,1	356,2
3	5	0,2	0,1	420,1
4	30	0,2	0,1	459,2
5	5	0,03	0,3	290,0
6	30	0,03	0,3	389,7
7	5	0,2	0,3	303,8
8	30	0,2	0,3	440,5
9	17,5	0,115	0,1	139,2
10	17,5	0,115	0,3	215,4

Из табл. 2 видно, что при малой глубине резания ($t = 0,1$ мм) с увеличением подачи от 0,03 до 0,2 мм/об температура растет в 1,29...2,29 раза. Такая разница объяснима тем, что при малой подаче доминирует объемная пластическая деформация и аккумуляция тепла у резца (низкая температура в зоне резания, но глубокий нагрев). При увеличении подачи происходит интенсивное срезание стружки с переносом основного тепловыделения в объем срезаемого слоя (высокая температура в зоне резания, но более равномерное распределение). Кроме того, к этому добавляется фактор фазовых превращений (аустенит/мартенсит), который может усиливать эффект.

Поскольку в литературе не установлены исследования по измерению температуры при точении рассматриваемого сплава, то сравнить полученные данные с результатами, установленными ранее другими исследователями, оказалось невозможным. Однако существует достаточно результатов по обработке жаропрочных сплавов на основе никеля, например сплава Inconel 718 [32]. Согласно представленным в указанной публикации данным, при обработке этого сплава со скоростью резания 30 м/мин, подачей 0,2 мм/зуб и глубиной резания 0,25 мм средняя температура резания составляет около 283 °C. При сопоставимом режиме резания сплава ТН-1 температу-

ра составила 440,5 °C (табл. 2). Таким образом, при обработке нитинола возникающая в зоне резания температура заметно выше, что можно объяснить меньшей теплопроводностью этого сплава по сравнению с Inconel 718.

Определение зависимости возникающей температуры от параметров режима резания проводилось двумя способами, чтобы в дальнейшем выбрать наиболее точную.

Первый способ заключался в применении преобразования Бокса – Кокса. Согласно этому методу значения переменных кодировались по следующим выражениям:

$$V_c = \frac{V - 17,5}{12,5}, \quad S_c = \frac{S - 0,115}{0,085}, \quad (1)$$

$$t_c = \frac{t - 0,2}{0,1},$$

где V_c , S_c , t_c – кодированные значения скорости резания, подачи и глубины резания соответственно. Реализация метода выполнялась на языке программирования Python. В результате преобразований была получена следующая формула в кодированных значениях:

$$\begin{aligned} \tilde{T} = & 480,6509 + 214,4369V_c + \\ & + 194,7511S_c + 23,0559t_c + 327,5388V_c^2 + \\ & + 327,5388S_c^2 - 130,4228S_c t_c. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение для пересчета из кодированных значений по формуле (2) имеет вид

$$T = (1 + 1,2319\tilde{T})^{1/1,2319}. \quad (3)$$

Вторым способом являлось применение специального программного обеспечения Statistica, позволяющего для функций от двух переменных вывести зависимость и построить график зависимости в виде поверхности отклика. Поскольку варьируемых параметров в исследованиях всего два, то были получены две зависимости – для каждого из значений глубины резания. Установленные формулы имеют следующий вид:

– для глубины резания $t = 0,1$ мм:

$$\begin{aligned} T = & 304,5154 - 16,3046V - 1806,1027S + \\ & + 0,6838V^2 - 31,4588VS + 14283,737S^2; \end{aligned} \quad (4)$$

– для глубины резания $t = 0,3$ мм:

$$\begin{aligned} T = & 398,7812 - 9,9281V - 2412,8143S + \\ & + 0,3812V^2 + 8,7059VS + 10569,7809S^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Поверхности отклика для обоих способов представлены на рис. 4 и 5.

Оценка адекватности выведенных зависимостей (2) – (5) выполнялась путем подстановки параметров режимов резания и сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными (табл. 3).

Для оценки точности расчетов по выведенным зависимостям выполнены расчеты относительной погрешности ε , %, которые представлены в табл. 3. Из таблицы ясно, что более точной является зависимость, полученная в программе Statistica (максимальная погрешность составила 5,8 %).

Причиной существенной разницы в результатах расчетов могут быть разные подходы в применявшихся методах аппроксимации. Цель преобразования Бокса – Кокса – приведение распределения отклика к более нормальному виду, стабилизация дисперсии. После преобразования строится модель уже на «исправленных» данных. Программа Statistica строит математическую модель, которая напрямую аппроксимирует поверхность отклика от двух переменных. Она определяет такие коэффициенты при членах, чтобы наилучшим образом описать данные. Поэтому в дальнейших расчетах принимались формулы (4) и (5).

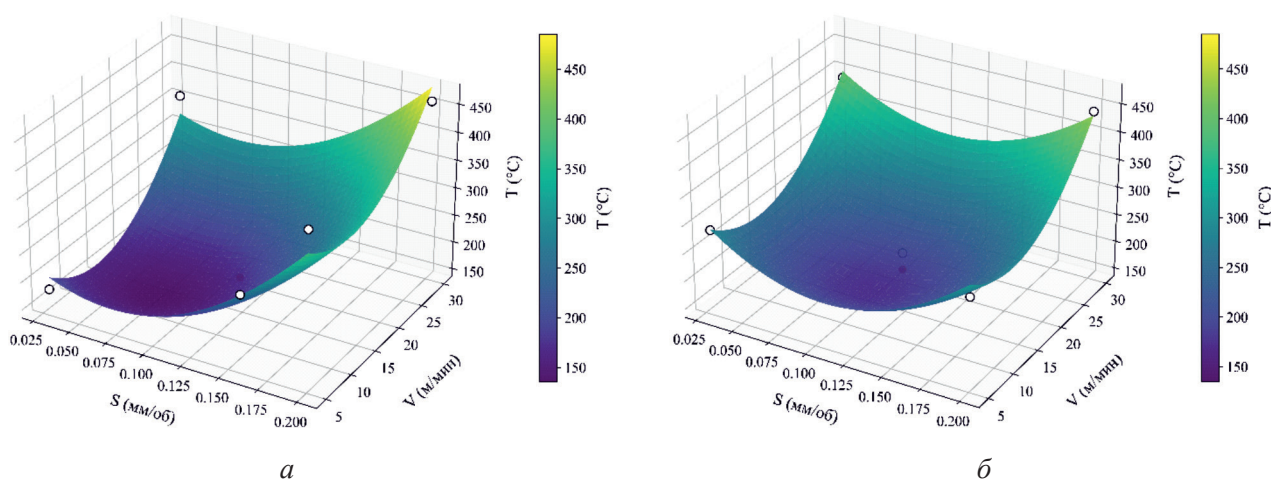


Рис. 4. Зависимости, построенные с помощью преобразования Бокса – Кокса:

а – при $t = 0,1$ мм; б – при $t = 0,3$ мм

Fig. 4. Dependencies plotted using the Box-Cox transformation:

а – at $t = 0.1$ mm; б – at $t = 0.3$ mm

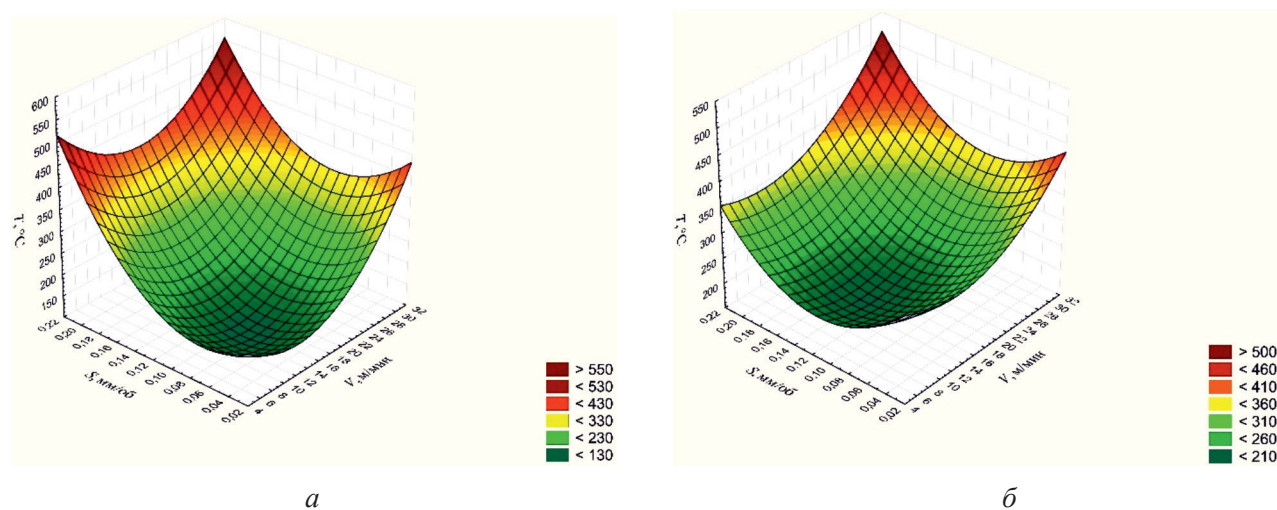


Рис. 5. Зависимости, построенные с помощью программы Statistica:

а – при $t = 0,1$ мм; б – при $t = 0,3$ мм

Fig. 5. Dependencies plotted using Statistica software:

а – at $t = 0.1$ mm; б – at $t = 0.3$ mm

Таблица 3

Table 3

Оценка адекватности выведенных зависимостей

Evaluation of the adequacy of derived dependencies

№ эксп. / Exp. No.	V , м/мин / V (m/min)	S , мм/об / S (mm/rev)	t , мм / t (mm)	T , °C (эксп.) / T (°C) (exp.)	T , °C (Бокс – Кокс.) / T (°C) (Box-Cox)	ε , % (Бокс – Кокс.) / ε (%) (Box-Cox)	T , °C (Statistica) / T (°C) (Statistica)	ε , % (Statistica) / ε (%) (Statistica)
1	5	0,03	0,1	183,4	205,6	12,1	194,0	5,8
2	30	0,03	0,1	356,2	323,4	–9,2	361,1	1,4
3	5	0,2	0,1	420,1	380,3	–9,5	418,8	–0,3
4	30	0,2	0,1	459,2	485,3	5,7	452,2	–1,5
5	5	0,03	0,3	290,0	291,1	0,4	297,1	2,4
6	30	0,03	0,3	389,7	401,7	3,1	389,0	–0,2
7	5	0,2	0,3	303,8	325,2	7,0	307,6	1,3
8	30	0,2	0,3	440,5	433,4	–1,6	436,5	–0,9
9	17,5	0,115	0,1	139,2	171,3	23,1	146,5	5,2
10	17,5	0,115	0,3	215,4	185,2	–14,0	221,6	2,9

По рис. 5, *а* и 5, *б* видно, что зависимости имеют точку минимума, поэтому целесообразно найти значения параметров режима резания, при которых температура резания минимальна. С этой целью выражения (4) и (5) были продифференцированы по V и S и приравнены к нулю. По полученным системам уравнений определены искомые значения скорости резания и подачи. Установлено, что при глубине резания $t = 0,1$ мм минимальная температура резания, равная 121,89 °C, возникает при скорости резания $V = 13,72$ м/мин и подаче $S = 0,08$ мм/об. При глубине резания $t = 0,3$ мм минимальная температура резания, равная 140,08 °C, возникает при скорости резания $V = 11,77$ м/мин и подаче $S = 0,11$ мм/об.

Таким образом, рекомендуемые режимы точения заготовок из никелида титана ТН-1 по наименьшей температуре резания будут следующие:

– при глубине резания $t = 0,1$ мм (чистовая обработка):

$$V = 13,72 \text{ м/мин}, S = 0,08 \text{ мм/об};$$

– при глубине резания $t = 0,3$ мм (получистовая обработка):

$$V = 11,77 \text{ м/мин}, S = 0,11 \text{ мм/об}.$$

Наличие точки минимума близко к центру плана экспериментов объясняется аустенитно-

мартенситными превращениями в материале: при попадании в интервал мартенситных превращений часть механической энергии расходуется на структурные изменения, а не на нагрев, что в данных условиях вызывает локальное снижение температуры.

Выводы

В работе выполнены исследования влияния параметров режима резания на температуру в зоне обработки при точении заготовок из никелида титана ТН-1. При достижении поставленной цели установлены математические зависимости, позволяющие расчетным путем определять температуру резания при заданных параметрах режима в рамках применявшихся диапазонов: скорость резания от 5 до 30 м/мин, подача от 0,03 до 0,2 мм/об и глубина резания от 0,1 до 0,3 мм. Погрешность расчетов при этом составит не более 5,8 %. Помимо этого установлены рациональные по температуре режимы резания и разработаны рекомендации по выбору параметров режима для чистовой и получистовой обработки.

Результаты позволят назначать параметры режимов резания по температуре в зоне обработки, что даст возможность контролировать процессы износа обрабатываемого инструмента и изменения, происходящие в материале при его нагреве.



Следует также отметить, что обработанные заготовки обладают технологической наследственностью – их свойства, такие как структура и текстура, после любого вида обработки меняются, что, в свою очередь, влияет на последующие стадии изготовления детали. Таким образом, полученные в настоящем исследовании результаты необходимо учитывать при необходимости выполнения доводочных операций, таких как поверхностное пластическое деформирование (ППД). Поскольку установлены математические зависимости, описывающие закономерности изменения возникающей температуры, то это позволит прогнозировать возможные изменения в материале, а также экстраполировать эти значения на другие виды обработки с некоторыми допущениями.

Список литературы

1. D'Addona D., Raykar S. Thermal modeling of tool temperature distribution during high pressure coolant assisted turning of Inconel 718 // *Materials*. – 2019. – Vol. 12 (3). – P. 408. – DOI: 10.3390/ma12030408.
2. Liu H., Meurer M., Bergs T. Modeling and monitoring of the tool temperature during continuous and interrupted turning with cutting fluid // *Metals*. – 2024. – Vol. 14 (11). – P. 1292. – DOI: 10.3390/met14111292.
3. Characterization and optimization of a locally boron-doped diamond tool for self-sensing of cutting temperature / S. Liu, L. An, H. Li, X. Fu, B.-F. Ju, Y.-L. Chen // *Nanomanufacturing and Metrology*. – 2024. – Vol. 7 (1). – P. 24. – DOI: 10.1007/s41871-024-00243-8.
4. Temperature measurement and numerical prediction in machining Inconel 718 / J. Díaz-Álvarez, A. Tapetado, C. Vázquez, H. Miguélez // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17 (7). – P. 1531. – DOI: 10.3390/s17071531.
5. Lakshmanan S., Pradeep Kumar M., Dhananchezian M. Optimization of turning parameter on surface roughness, cutting force and temperature through TOPSIS // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 72. – P. 2231–2237. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.209.
6. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting / A. Kus, Y. Isik, M.C. Cakir, S. Coşkun, K. Özdemir // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15 (1). – P. 1274–1291. – DOI: 10.3390/s150101274.
7. Development of a multi-sensor concept for real-time temperature measurement at the cutting insert of a single-lip deep hole drilling tool / J. Ramme, R. Wegert, V. Guski, S. Schmauder, H.-C. Moehring // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (14). – P. 7095. – DOI: 10.3390/app12147095.
8. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti–6Al–4V / G. Li, W. Lu, S. Huang, X. Zhang, S. Ding // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8 (11). – P. e11661. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11661.
9. Лапшин В.П., Русановский Р.В., Туркин И.А. Оценка влияния скорости реакции термодинамической подсистемы на динамику процесса резания при металлообработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 17–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-17-30.
10. Патил Н.Г., Сараф А.Р., Кулкарни А.П. Полуэмпирическое моделирование температуры резания и шероховатости поверхности при точении конструкционных материалов твердосплавным инструментом с покрытием TiAlN // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 155–174. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-155-174.
11. Исследование термонагруженности процесса точения металл-композитной системы в зависимости от скорости, подачи и глубины резания при обработке тонкостенной металлической оболочки толщиной 2 мм / Н.С. Любимый, Б.С. Четвериков, С.В. Клюев, Н.А. Загородний, А.А. Польшин, А.К. Мальцев, М.В. Быщенко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 131–147. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-131-147.
12. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
13. Ślusarczyk Ł., Franczyk E. Estimation of temperature in the cutting area during orthogonal turning of grade 2 titanium // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 125. – P. 4485–4496. – DOI: 10.1007/s00170-023-10877-5.
14. Ślusarczyk Ł. Experimental-analytical method for temperature determination in the cutting zone during orthogonal turning of GRADE 2 titanium alloy // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (15). – P. 4328. – DOI: 10.3390/ma14154328.
15. Effects of cryogenic cooling on cutting temperature and surface roughness in turning of AA7075 aluminum alloy / S. Ranjbar, A. Foorginejad, S.M. Emam, M. Ebadi, K. Shiri // *Scientific Reports*. – 2026. – Vol. 16. – P. 7914. – DOI: 10.1038/s41598-026-39003-7.
16. Influence of cemented carbide composition on cutting temperatures and corresponding hot hard-

nesses / A. Vornberger, T. Picker, J. Pötschke, M. Herrmann, B. Denkena, A. Krödel, A. Michaelis // *Materials*. – 2020. – Vol. 13 (20). – P. 4571. – DOI: 10.3390/ma13204571.

17. Study of cutting temperature during turning of high-hard cast irons / O. Bohdanov, V. Derbaba, S. Dubrovskiy, V. Ruban, N. Nazarenko // *Collection of Research Papers of the National Mining University*. – 2023. – Vol. 75. – P. 44–54. – DOI: 10.33271/crpnmu/75.044.

18. Sandhu N., Singh R., Singh N. Analysis of tool wear and cutting temperature in WS₂-assisted MQL turning of H13 steel // *Discover Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 4. – P. 55. – DOI: 10.1007/s44245-025-00136-0.

19. Investigation of cutting temperature during Al-Cu₃MgMn₂Pb aluminium alloy turning / R. Dubovska, J. Majerik, I. Baska, J. Jambor // *Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 15 (5). – P. 796–801. – DOI: 10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/5/796.

20. Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel / G. Kónya, J. Takács, I. Miskolczi, Z.F. Kovács // *Production Engineering Archives*. – 2024. – Vol. 30 (2). – P. 251–258. – DOI: 10.30657/pea.2024.30.24.

21. Chaudhari R., Vora J.J., Parikh D.M. A review on applications of nitinol shape memory alloy // *Recent advances in mechanical infrastructure* / ed. by A.K. Parwani, P. Ramkumar, K. Abhishek, S.K. Yadav. – Singapore: Springer, 2021. – P. 123–132. – (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure). – DOI: 10.1007/978-981-33-4176-0_10.

22. Кульчицкий А.А. Режимы резания при обработке никель-титановых сплавов // *Металлообработка*. – 2001. – № 3 (3). – С. 11–12.

23. Упрочнение поверхности нитинола для повышения качества шлифования / Д.Ю. Казимиров, А.В. Прокопьева, А.Д. Астахов, О.А. Медведев, А.Д. Лушпей // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2021. – Т. 8, № 3–4. – С. 25–29.

24. Албагачиев А.Ю., Хасьянова Д.У. Особенности процесса трения при дорновании деталей из нитинола // *Вестник машиностроения*. – 2021. – № 5. – С. 40–43. – DOI: 10.36652/0042-4633-2021-5-40-43.

25. Албагачиев А.Ю., Хасьянова Д.У. Особенности формирования и высокотемпературной обработки пустотелых заготовок при изготовлении деталей

из сплава с эффектом памяти формы // *Вестник машиностроения*. – 2019. – № 7. – С. 59–62.

26. A state-of-the-art review on micro-machining of nitinol shape memory alloys and optimization of process variables considering the future trends of research / S. Dutta, D.K. Sarma, J. Vora, R. Chaudhari, A. Bhowmik, P. Samal, S. Khanna // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9. – P. 183. – DOI: 10.3390/jmmp9060183.

27. Experimental analysis and optimization of MQL turning of nitinol 56 alloy: a comparative study of grey, utility, and TOPSIS methods / D. Sureja, S. Kumari, R.S. Kumar, K. Abhishek, A. Saxena, S.S. Abdullaev // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. – 2024. – Vol. 18. – P. 3427–3438. – DOI: 10.1007/s12008-023-01621-0.

28. Naresh Ch., Sameer M.D., Bose P.S.Ch. Comparative analysis of RSM, ANN and ANFIS techniques in optimization of process parameters in laser assisted turning of NITINOL shape memory alloy // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 11. – P. 371–401. – DOI: 10.1007/s40516-024-00247-8.

29. Utility function approach integrated with fuzzy for optimization in dry turning of nitinol 56 / S. Kumari, D. Sureja, K. Abhishek, G. Kumar // *Recent Advances in Materials and Manufacturing Science. ICRAM 2025*. – Singapore: Springer, 2025. – P. 465–476. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering). – DOI: 10.1007/978-981-95-0063-5_36.

30. A review on high speed micro-milling of shape memory alloy (NiTi₆₀): process and post perspective / R.R. Kundiya, M. Kadam, P. Jadhav, R. Pawade // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. – 2025. – Vol. 19. – P. 2337–2353. – DOI: 10.1007/s12008-024-02153-x.

31. Naresh C., Bose P.S.C., Rao C.S.P. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy models for predicting WEDM machining responses of Nitinol alloy: comparative study // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2 (2). – P. 1–23. – DOI: 10.1007/s42452-020-2083-y.

32. Using the chip-tool thermocouple method to measure the temperature in the milling of Inconel 718 under different lubri-cooling strategies / L.M.Q. Barbosa, P.H.P. França, G.H.N. Fernandes, V. Baldin, P.S. Martins, Á.R. Machado // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 140. – P. 5435–5447. – DOI: 10.1007/s00170-025-16568-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 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



Investigation of temperature during machining of titanium nickelide TN-1

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

¹ National Research University "MIET", 1 Shokin Square, Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

² Togliatti State University, 14 Belorusskaya Str, Togliatti, 445020, Russian Federation

³ Kaliningrad State Technical University, 1 Sovetsky Avenue, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

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

^c  <https://orcid.org/0000-0001-9181-5704>,  renatkamenov@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>,  dmitrij.podashev@klgtu.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0008-6040-0600>,  patersort@list.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0003-2113-2192>,  k.kisel-ks@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 05 March 2026

Revised: 30 May 2026

Accepted: 11 July 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

Mechanical machining

Titanium nickelide (nitinol)

Cutting temperature

Thermal imager

Machining mode

Cutting speed

Feed

Depth of cut

Technological heredity

Surface plastic deformation

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. The temperature generated in the machining zone is a critical parameter that affects the dimensional accuracy, surface quality, material properties of the workpiece, and tool wear resistance. This is especially important when machining critical components for machinery operating under severe conditions. Such parts are typically made from heat-resistant alloys, with titanium nickelide (nitinol) being a notable example. Temperature can be influenced by various methods, but the primary approach used in this study was the selection of rational machining parameters. **The purpose of this work** is to evaluate the impact of cutting parameters on the temperature generated during the machining of titanium nickelide workpieces. **Materials and methods.** Experimental studies were conducted on the turning of titanium nickelide (TN-1) workpieces. The variable parameters in the tests were the cutting parameters: cutting speed V (m/min), feed rate S (mm/rev), and depth of cut t (mm). The temperature T (°C) generated during machining was measured using a CEM DT-9897 thermal imager. The machining process was recorded during the tests, and was later reviewed to determine the peak cutting temperature. This value was taken as the average cutting temperature, as its maximum occurs at the contact point between the chip and the workpiece's front surface, which is obscured from direct observation by the chip itself. **Results and discussion.** The following results are obtained during the research: experimental studies are conducted according to a developed plan, and the cutting temperature generated under various turning modes of TN-1 titanium nickelide workpieces are determined; mathematical dependencies of temperature on cutting parameters are established; verification of the obtained dependencies is performed by comparing calculated cutting temperatures with experimental data (it is found that, according to the derived dependencies, the calculation error does not exceed 5.8%); rational turning modes for titanium nickelide workpieces are established based on cutting temperature, and recommendations for selecting cutting parameters for finish and semi-finish machining are developed.

For citation: Bobrovskij N.M., Kisel' A.G., Kamenov R.U., Podashev D.B., Tselikov P.V., Kisel' K.Kh. Investigation of temperature during machining of titanium nickelide TN-1. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 58–69. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-58-69. (In Russian).

References

1. D'Addona D., Raykar S. Thermal modeling of tool temperature distribution during high pressure coolant assisted turning of Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12 (3), pp. 408. DOI: 10.3390/ma12030408.
2. Liu H., Meurer M., Bergs T. Modeling and monitoring of the tool temperature during continuous and interrupted turning with cutting fluid. *Metals*, 2024, vol. 14 (11), p. 1292. DOI: 10.3390/met14111292.

* Corresponding author

Kisel' Anton G., Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher
 Togliatti State University,
 14 Belorusskaya St.,
 445020, Togliatti, Russia
 Tel.: +7 999 458-08-25, e-mail: kisel1988@mail.ru

3. Liu S., An L., Li H., Fu X., Ju B.-F., Chen Y.-L. Characterization and optimization of a locally boron-doped diamond tool for self-sensing of cutting temperature. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, vol. 7 (1), p. 24. DOI: 10.1007/s41871-024-00243-8.
4. Díaz-Álvarez J., Tapetado A., Vázquez C., Miguélez H. Temperature measurement and numerical prediction in machining Inconel 718. *Sensors*, 2017, vol. 17 (7), p. 1531. DOI: 10.3390/s17071531.
5. Lakshmanan S., Pradeep Kumar M., Dhananchezian M. Optimization of turning parameter on surface roughness, cutting force and temperature through TOPSIS. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 72, pp. 2231–2237. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.209.
6. Kus A., Isik Y., Cakir M.C., Coşkun S., Özdemir K. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors*, 2015, vol. 15 (1), pp. 1274–1291. DOI: 10.3390/s150101274.
7. Ramme J., Wegert R., Guski V., Schmauder S., Moehring H.-C. Development of a multi-sensor concept for real-time temperature measurement at the cutting insert of a single-lip deep hole drilling tool. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (14), p. 7095. DOI: 10.3390/app12147095.
8. Li G., Lu W., Huang S., Zhang X., Ding S. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti–6Al–4V. *Heliyon*, 2022, vol. 8 (11), p. e11661. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11661.
9. Lapshin V.P., Rusanovsky R.V., Turkin I.A. Evaluation of the influence of the reaction rate of the thermodynamic subsystem on the dynamics of the cutting process in metalworking. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 17–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-17-30. (In Russian).
10. Patil N.G., Saraf A.R., Kulkarni A.P. Semi empirical modeling of cutting temperature and surface roughness in turning of engineering materials with TiAlN coated carbide tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 155–174. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-155-174. (In Russian).
11. Lyubimiy N.S., Chetverikov B.S., Klyuev S.V., Zagorodniy N.A., Polshin A.A., Maltsev A.K., Bytsenko M.V. Investigation of the thermal loading during turning of a metal–composite system as a function of cutting speed, feed rate, and depth when machining a thin-walled 2 mm metal shell. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 131–147. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-131-147. (In Russian).
12. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibration in metal turning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58. (In Russian).
13. Ślusarczyk Ł., Franczyk E. Estimation of temperature in the cutting area during orthogonal turning of grade 2 titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 125, pp. 4485–4496. DOI: 10.1007/s00170-023-10877-5.
14. Ślusarczyk Ł. Experimental-analytical method for temperature determination in the cutting zone during orthogonal turning of GRADE 2 titanium alloy. *Materials*, 2021, vol. 14 (15), p. 4328. DOI: 10.3390/ma14154328.
15. Ranjbar S., Foorginejad A., Emam S.M., Ebadi M., Shiri K. Effects of cryogenic cooling on cutting temperature and surface roughness in turning of AA7075 aluminum alloy. *Scientific Reports*, 2026, vol. 16, p. 7914. DOI: 10.1038/s41598-026-39003-7.
16. Vornberger A., Picker T., Pötschke J., Herrmann M., Denkena B., Krödel A., Michaelis A. Influence of cemented carbide composition on cutting temperatures and corresponding hot hardnesses. *Materials*, 2020, vol. 13 (20), p. 4571. DOI: 10.3390/ma13204571.
17. Bohdanov O., Derbaba V., Dubrovskiy S., Ruban V., Nazarenko N. Study of cutting temperature during turning of high-hard cast irons. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 2023, vol. 75, pp. 44–54. DOI: 10.33271/crpnmu/75.044.
18. Sandhu N., Singh R., Singh N. Analysis of tool wear and cutting temperature in WS₂-assisted MQL turning of H13 steel. *Discover Mechanical Engineering*, 2025, vol. 4, p. 55. DOI: 10.1007/s44245-025-00136-0.
19. Dubovska R., Majerik J., Baska I., Jambor J. Investigation of cutting temperature during AlCu3MgMnPb aluminium alloy turning. *Manufacturing Technology*, 2015, vol. 15 (5), pp. 796–801. DOI: 10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/5/796.
20. Kónya G., Takács J., Miskolczi I., Kovács Z.F. Investigation of the effects of machining parameters on cutting conditions during orthogonal turning of austenite stainless steel. *Production Engineering Archives*, 2024, vol. 30 (2), pp. 251–258. DOI: 10.30657/pea.2024.30.24.

21. Chaudhari R., Vora J.J., Parikh D.M. A review on applications of nitinol shape memory alloy. *Recent Advances in Mechanical Infrastructure. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Singapore, Springer, 2021, pp. 123–132. DOI: 10.1007/978-981-33-4176-0_10.
22. Kul'chitskii A.A. Rezhimy rezaniya pri obrabotke nikel'-titanovykh splavov [Cutting modes for machining nickel-titanium alloys]. *Metalloobrabotka = Metalworking*, 2001, no. 3 (3), pp. 11–12.
23. Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V., Astahov A.D., Medvedev O.A., Lushpey A.D. Uprochnenie poverkhnosti nitinola dlya povysheniya kachestva shlifovaniya [Surface hardening of nitinol for increased grinding quality]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Aktual Problems in Machine Building*, 2021, vol. 8, no. 3–4, pp. 25–29. (In Russian).
24. Albagachiev A.Yu., Khasyanova D.U. Osobennosti protsessa treniya pri dornovanii detalei iz nitinola [Friction in burnishing alloy parts with shape memory]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2021, no. 5, pp. 40–43. DOI: 10.36652/0042-4633-2021-5-40-43. (In Russian).
25. Albagachiev A.Yu., Khasyanova D.U. Osobennosti formirovaniya i vysokotemperaturnoi obrabotki pustotelykh zagotovok pri izgotovlenii detalei iz splava s efektom pamyati formy [Production of hollow alloy blanks with shape memory effect]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 2019, no. 7, pp. 59–62. (In Russian).
26. Dutta S., Sarma D.K., Vora J., Chaudhari R., Bhowmik A., Samal P., Khanna S. A state-of-the-art review on micro-machining of nitinol shape memory alloys and optimization of process variables considering the future trends of research. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, vol. 9, p. 183. DOI: 10.3390/jmmp9060183.
27. Sureja D., Kumari S., Kumar R.S., Abhishek K., Saxena A., Abdullaev S.S. Experimental analysis and optimization of MQL turning of nitinol 56 alloy: a comparative study of grey, utility, and TOPSIS methods. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, vol. 18, pp. 3427–3438. DOI: 10.1007/s12008-023-01621-0.
28. Naresh Ch., Sameer M.D., Bose P.S.Ch. Comparative analysis of RSM, ANN and ANFIS techniques in optimization of process parameters in laser assisted turning of NITINOL shape memory alloy. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 11, pp. 371–401. DOI: 10.1007/s40516-024-00247-8.
29. Kumari S., Sureja D., Abhishek K., Kumar G. Utility function approach integrated with fuzzy for optimization in dry turning of nitinol 56. *Recent Advances in Materials and Manufacturing Science. ICRAM 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2025, pp. 465–476. DOI: 10.1007/978-981-95-0063-5_36.
30. 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. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2025, vol. 19, pp. 2337–2353. DOI: 10.1007/s12008-024-02153-x.
31. Naresh C., Bose P.S.C., Rao C.S.P. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy models for predicting WEDM machining responses of Nitinol alloy: comparative study. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2 (2), pp. 1–23. DOI: 10.1007/s42452-020-2083-y.
32. Barbosa L.M.Q., França P.H.P., Fernandes G.H.N., Baldin V., Martins P.S., Machado Á.R. Using the chip-tool thermocouple method to measure the temperature in the milling of Inconel 718 under different lubri-cooling strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 140, pp. 5435–5447. DOI: 10.1007/s00170-025-16568-7.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).