

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.923.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133



ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НИТИНОЛА С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Казимиров Д.Ю., Солер Я.И.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Перспективы применения уникального металла с эффектом памяти формы в конструкциях механизмов тормозятся проблемами его механической обработки. Данное исследование предназначено для повышения обрабатываемости нитинола. **Цель работы.** Доказать возможность фазового превращения «мартенсит – аустенит» нитинола на поверхности технологическими методами, позволяющего добиться точности абразивной обработки плоскостей. **Используемые методы.** Работа представляет собой экспериментальное исследование с использованием математической статистики. **Новизна.** Определено, что в отличие от других металлов нитинол нельзя характеризовать хорошей обрабатываемостью резанием при снятии больших объемов припуска с высокой производительностью процесса. **Результат.** Впервые подтверждена возможность управления фазовыми превращениями в нитиноле параметрами режима шлифования. На основе дисперсионного и регрессионного анализов получены стохастические модели и изучены поверхности отклика - микротвердости, как одной их главных характеристик фазового состава металла, учитывающие влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента. Получены изменения точности поверхности при шлифовании поверхности с предварительным термическим упрочнением плазмой и закалкой в воде, так и без нее. В конечном счете обеспечена обрабатываемость нитинола с температурой срабатывания выше +75°C за счет изменения микротвердости в поверхностном слое деталей благодаря фазовым превращениям. **Практическая значимость.** Предложены уравнения описания показателя качества поверхности, величины и закономерности изменения погрешности формы плоскостей. Даны рекомендации для кругов, в частности по зернистости и пористости. Разработаны режимы шлифования с обильным охлаждением и параметры термического упрочнения плазмой, позволяющие гарантированно обеспечить отклонение от плоскостности до 7 мкм. Предложен маршрут обработки деталей из нитинола.

Ключевые слова: точность формы, микротвердость, шлифование, термообработка плазмой, никелид титана, фазовые превращения

© Казимиров Д.Ю., Солер Я.И., 2024

Для цитирования

Казимиров Д.Ю., Солер Я.И. Обеспечение точности поверхности при шлифовании нитинола с высокой температурой превращений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 120-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ACHIEVE SURFACE PRECISION WHEN GRINDING NITINOL WITH HIGH TRANSFORMATION TEMPERATURES

Kazimirov D.Yu., Soler Y.I.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The prospects for the use of a unique metal with a shape memory effect in the design of machinery are hampered by the problems of its mechanical processing. This research is designed to improve the machinability of nitinol. **Objectives.** It is required to prove the possibility of the martensite-austenite phase transformation of nitinol on the surface using technological methods, which allows achieving precision in abrasive processing of planes. **Methods Applied.** The work is an experimental study using mathematical statistics. **Originality.** It has been determined that nitinol, unlike other metals, has low cutting machinability when removing large volumes of materials with high process productivity. **Result.** For the first time, the possibility of controlling phase transformations in nitinol by grinding mode parameters has been confirmed. Based on ANOVA and regression analyses, stochastic models were obtained and microhardness response surfaces were studied, as one of the main characteristics of the phase composition of the metal, taking into account the influence of grinding modes and characteristics of the abrasive tool. Changes in surface accuracy were obtained when grinding the surface with preliminary thermal hardening by plasma and quenching in water, and without it. Ultimately, the machinability of nitinol with an operating temperature above +75°C is ensured due to changes in microhardness in the surface layer of parts because of phase transformations. **Practical Relevance.** Equations are proposed to describe the surface quality indicator, the magnitude and pattern of changes in the error of the shape of the planes, as well as recommendations for abrasive wheels, in particular regarding grain size and porosity. Grinding modes with abundant cooling and plasma thermal hardening parameters have been developed to ensure a guaranteed deviation from flatness of up to 7 microns. A technological process route for processing nitinol parts has been proposed.

Keywords: shape accuracy, microhardness, grinding, plasma heat treatment, titanium nickelide, phase transformations

For citation

Kazimirov D.Yu., Soler Y.I. Achieve Surface Precision When Grinding Nitinol With High Transformation Temperatures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 120-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133>

Введение

Сплавы на основе никель-титана (NiTi) обладают особыми свойствами, в том числе эффектом памяти формы, необходимым для механизмов пределом прочности, высокой термической и коррозионной стойкостью. Они применяются во многих отраслях машиностроения (аэрокосмической, робототехнической, автомобильной) в качестве актуаторов и в биомедицине.

Потребность эффекта памяти формы при высокой долговизне никелида титана привела к созданию гибридных конструкций, совершающих механическую работу в заданных температурных условиях, а также композиционных соединений или биметаллов. Активно исследуются методы получения и физико-механические свойства сварных конструкций из нитинола с различными марками сталей, которые используются для изготовления термомеханических силовых элементов, сочетающих высокую прочность стали со сверхупругим поведением нитинола [1]. Перспективным направлением в области создания гибридных конструкций является разработка методов получения неразъемных соединений нитинола с ти-

тановыми сплавами [2, 16]. Благодаря таким соединениям обеспечивается экономия и рациональное использование нитинола.

Обрабатываемость этих сплавов затруднена из-за их высокой пластичности и химической активности, низких теплопроводности и модуля упругости. Как указано в [3], физико-механические свойства интерметаллического соединения никеля и титана сильно отличаются от титановых сплавов. Известно, что нитинол при комнатной температуре может находиться в двух разных фазовых состояниях. В фазе мартенсита (низкотемпературное состояние NiTi) его предел текучести и модуль упругости в несколько раз ниже, чем в состоянии austенита.

Основной причиной низкой обрабатываемости резанием считается высокая прочность на разрушение, составляющая 755–960 МПа [4], при низком коэффициенте вязкости разрушения. В механике разрушения указанный параметр играет доминирующую роль. Формирование трещины требует значительных напряжений в зоне сдвига, от чего процесс заторможен, а образование стружки затруднено. Неравномерные деформации сдвига стружки локализованы в узкой полосе. Это приводит к колебаниям сил реза-

ния с возникновением вибраций, которые в сочетании с высокой температурой могут вызывать преждевременные усталостные разрушения лезвийных инструментов. При малой теплопроводности NiTi усиливаются негативные эффекты при концентрации теплоты в зоне резания. Это приводит к аккумуляции высокой температуры на границе раздела «режущая кромка – заготовка» с последующим катастрофическим ее износом.

Для NiTi традиционные процессы обработки, как точение и фрезерование, затруднены, поскольку они могут вызывать негативные изменения твердости и размеров зерен в слоях, а также фазовые превращения [5]. Сказанное снижает эффект памяти формы деталей из никелида титана [6, 17]. В связи с чем форму деталей из заготовок, например плита или лист, получают электроэррозионной обработкой.

В то же время нитинол хорошо поддается абразивной обработке, что позволяет обеспечивать высокие показатели чистоты поверхности. Исследования, посвященные шлифованию никелида титана, направлены на повышение его обрабатываемости [7]. Дальнейшим развитием в этой области является поиск эффективного абразива для шлифования без потери функциональных свойств нитинола [8]. Однако нитинол, как и другие интерметаллиды на основе титана, имеют ряд проблем с обрабатываемостью шлифованием [9]. Шлифование может вызвать рост температур резания, что в сочетании с напряжениями в зоне обработки негативно воздействуют на микроструктуру и фазовый состав мартенсита NiTi [10-12, 18]. Одновременно при шлифовании без эффективного охлаждения снижается точность формы поверхности [13], образуется псевдорегулярный макрорельеф с чередованием выступов и впадин. В то же время при шлифовании NiTi в аустенитном состоянии отсутствуют указанные проблемы и повышается эффективность процесса.

Цель работы – обеспечить повышение точности обработки никелида титана фазовым переходом «мартенсит – аустенит» за счет теплового воздействия при обработке абразивным инструментом и поверхностной закалкой плазмой, а также сохранением этой фазы до окончания шлифования.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – цилиндрические образцы с размерами $D \times H = 40 \times 35$ мм, полученные из круглого проката материала ТН-1 следующего состава: Ti – 44,31 at. % и Ni – 55,69 at. %, производство ООО «МАТЭК-СПФ», г. Москва, Россия. Температура конца мартенситного превращения, равная $+78^\circ\text{C}$, предполагает нахождение металла при комнатной температуре в состоянии мартенсита, а также предопределяет кратковременное появление фазы аустенита в процессе шлифования. Свойства фаз приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства исследуемого материала NiTi
Table 1. Properties of the NiTi material under study

Характеристика	Фаза никелида титана	
	Мартенсит	Аустенит
Предел прочности, МПа	800–900	
Предел текучести, МПа	50–150	200–700
Теплопроводность, Вт/см·К	0,08	0,18
Коэффициент теплового расширения, $^\circ\text{C}^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	470	
Коэффициент вязкости разрушения, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (ГОСТ 25.506-85)	39–53	–
Прочность на разрушение, МПа	755–960	

Примечание. Никелид титана обладает сверхэластичностью, поэтому его предел прочности дополнен сопротивлением разрушению [14].

Предварительно на всех образцах подрезались торцы «как чисто» с биением не более 0,1 мм твердо-сплавным резцом с покрытием TiN на режиме: $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,055 \text{ мм/об}$, $t = 0,03 \text{ мм}$. Отметим, что повышение режимов приводило к неминуемому разрушению резца. Подрезка допустима только от центра к краю, иначе, приближаясь к центру, где $V \rightarrow 0$, следовал скол режущей кромки. Но даже при таких условиях стойкость режущей кромки не превышала 3–4-х проходов. На шлифовальном станке модели ЗГ71М образцы закреплялись так, чтобы плоский торец цилиндрического образца был параллельный подачам. Обработка велась многопроходным шлифованием. Основные условия исследования представлены в табл. 2, остальные оставались неизменными.

Характеристики абразивного инструмента выбраны с учетом исследовательской задачи, заключающейся в создании и регулировании теплового потока в зоне шлифования. Известно, что высокая пористость способствует проникновению СОЖ за счет центробежных сил и интенсифицирует теплоотвод в зоне резания. Кроме того, на количество теплоты при резании оказывает влияние и такая характеристика, как размер зерен, поэтому предложено ее также варьировать. Силовой фактор в экспериментах рассматривался незначимым. Параметры процесса и условия правки трех различных характеристик кругов сохранились одинаковыми.

Для протекания процесса фазового превращения в образцах из ТН-1 установлены увеличенные значения врезания и перебега, равные 100 мм. Таким образом, задавалось время выдержки.

Для проверки выдвинутой гипотезы о влиянии интенсивности нагрева при шлифовании никелида титана на его фазовые превращения был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^2 с центральной точкой, позволяющей выявить нелинейность зависимой переменной, для каждого инструмента i в отдельности. Для оценки изменчивости ошибки эксперимента планы были частично реплицированы в центральной точке плана с $n = 3$. Факторы и их уровни приведены в табл. 3.

Таблица 2. Основные условия экспериментов
Table 2. Basic experimental conditions

Технологический фактор/параметр	Значение
Абразивный круг:	Форма 01
код или уровень $i = 1$, зеленый карбид кремния, зернистость $F60$ (25 ГОСТ3647-80), обычная пористость	$63CF60 K6 V$
код или уровень $i=2$, черный карбид кремния, зернистость 60 (25 ГОСТ3647-80), высокая пористость	$Norton 37C60 K12 VP$
код или уровень $i = 3$, зеленый карбид кремния, зернистость 46 (40 ГОСТ3647-80), высокая пористость	$Molema 08C046 I12 V01P2$
Скорость круга, м/с	35
Глубина резания t , мм	0,01
Припуск z , мм	0,18
Количество выхаживающих проходов	1
Врезание, перебег, мм	100
Подача СОЖ – 5%-й водный раствор «Аквол-6», л/мин	8-10

Таблица 3. Условия проведения полного факторного эксперимента типа 2^2
Table 3. Conditions for conducting a full factorial experiment of the 2^2 type

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		верхний (+1,00)	основной (0,00)	нижний (-1,00)
A – продольная подача S , м/мин	2	8	6	4
B – поперечная подача $S_{\text{п}}$, мм/дв. ход	2	6	4	2

Результаты экспериментов оценивались качественными и количественными характеристиками. Для обработанной поверхности снималась топографическая картина с использованием метода красок, который удобен для индикации впадин на макронефровностях. Предварительно на образец наносится слой масляной краски «Краплак красный» по ТУ 2331-023-05751640-2007. Эта краска обладает размером помола крупниц породы до 2 мкм, которые заполняют впадины от 2 мкм и более. Ею покрывали поверхность ровным слоем с помощью резинового валика. Излишки нанесенной краски удалялись с изучаемой поверхности до прекращения переноса на скользящий эталон плоскостности – плиту гранитную поверхочную 400×400, класс точности 1 ТУ 2-034-802-74. Объект изучения фотографировался аппаратом в режиме макросъемки с расстоянием фокусировки 250 мм. На основе полученной топографии определялись отклонения от плоскостности Δ между выявленными выступом и впадиной микатором 2ИПМ с ценой деления 1 мкм. В работе измерялась микротвердость поверхности HV 0,2 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 без изменений по глубине, которую определяли на ПМТ-3 четырехгранной пирамидой при нагрузке 200 г с выдержкой 10 с. Это позволило косвенно выявить структурно-фазовые превращения, поскольку микротвердость аустенитной фазы выше, чем мартенситной. Съем припуска и шлифуемость разных фаз никелида титана оценивалась изменением веса образца, измеренного на ЕТ-2000П с ценой деления 0,01 г.

Полученные результаты и их обсуждение

Наблюдения за процессом шлифования никелида титана подтвердили правильность постановки эксперимента по влиянию режимов шлифования на явления, протекающие в процессе. Отмечено, что при шлифовании с наименьшей интенсивностью процесса наблюдалось значимое уменьшение съема металла t , сопровождающееся слабым «искрением» от шлифования. Это происходило только при рабочем ходе инструмента и в той полуплоскости, которая соответствовала выходу круга из заготовки по вектору подачи $S_{\text{п}}$. При этом съем снижался, когда была уже удалена часть припуска, то есть не на первом ходе, что связано с повышением физико-механических характеристик обрабатываемого мартенсита.

В процессе обработки при перемещении круга по вектору подачи $S_{\text{п}}$ в полуплоскости, с которой началось врезание от рабочего к центру, происходит постепенное накопление тепла у поверхности детали, при этом обработка мягкого и вязкого аустенита ведется с легким удалением металла с поверхности и формированием псевдорегулярного рельефа от движений по продольной подаче. В той полуплоскости, с которой следует выход круга, накопленное тепло приводит к структурно-фазовым превращениям, а в момент быстрого охлаждения СОЖ и к повышению физико-механических характеристик. Возникающий при этом более прочный аустенит обрабатывается иначе, без температурных и упругопластических составляющих погрешности. Шлифование переходит в

процесс тонкой абразивной обработки, сопровождающийся снижением интенсивности съема и повышением точности поверхности. За время нахождения абразивного круга вне контакта с заготовкой (в то время, пока задается глубина для следующего прохода) деталь остыла и данное явление повторялось, но уже в противоположной полуплоскости.

Подтверждено то, что существует закономерность между съемом m , погрешностью формы Δ и режимом, при котором изменяется поверхностная микротвердость HV. Для возможности изучения данного явления построена корреляция в виде трехкомпонентной точечной диаграммы $m, \Delta = f(HV)$, в которой приведены результаты всех опытов и характеристик кругов. Выделены точки те опыты, которые соответствуют неинтенсивному процессу шлифования ($A = B = -1$), а эллипсом – направление корреляции (рис. 1).

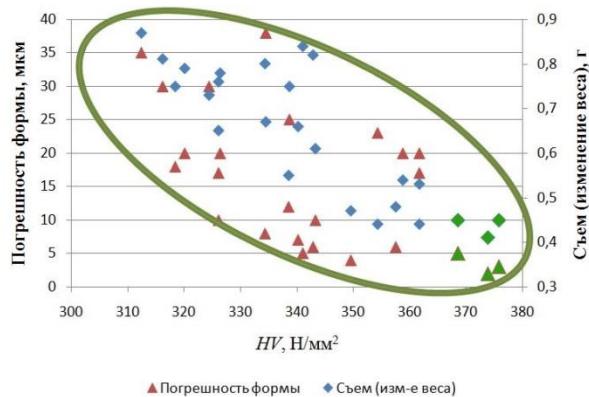


Рис. 1. Точечная диаграмма экспериментальных значений погрешности формы Δ и съема веса m от микротвердости поверхности HV для всех опытов

Fig. 1. Scatter plot of experimental values of shape error Δ and weight removal m from surface microhardness HV for all experiments

Как видно из представленной диаграммы, с увеличением поверхностной микротвердости более 350 Н/мм² съем m заметно уменьшается, а до 340 HV он выше и характеризуется изменением веса после шлифования от 0,6 до 0,9 г. При превышении микротвердости 360 HV, являющейся характерной для аустенитной фазы никелида титана, вес изменяется не более чем на 0,45 г. Похожую, но менее выраженную картину имеет и погрешность формы, что вероятно связано с исходной погрешностью заготовки и особенностями многопроходного шлифования. Следовательно, определяющим в такой закономерности является микротвердость. При этом после шлифования происходило повышение поверхностной микротвердости по сравнению с исходной, равной 290 HV. Степень наклена изменяется от 9–12% для $A;B = +1;+1$, до 20–29% при $A;B = -1;-1$. Меньшее значение получено для круга $i = 2$, что объяснимо в связи с меньшей

возможной из трех температуры резания благодаря малой зернистости и высокой пористости, а большее значение для инструмента $i=3$. В последнем случае возможной доминантой выступило более крупное зерно.

Для производительного режима шлифования ($A = B = +1$) съем припуска был наибольшим и устойчивым на всем протяжении шлифования и на всех рабочих ходах при выбранных характеристиках абразивного инструмента $i=1, 2, 3$ (рис. 2). Так, снижение веса образца m после шлифования в 1,6–1,9 раза больше по сравнению с противоположной точкой плана $A;B = -1;-1$.

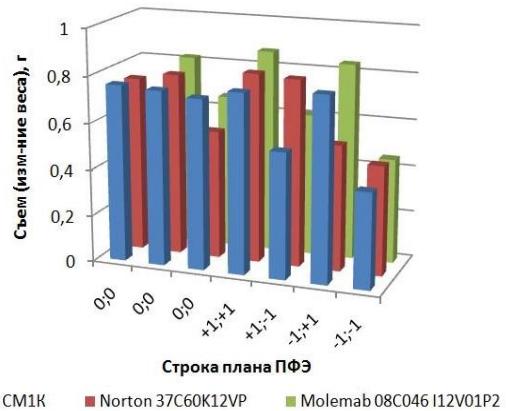


Рис. 2. Влияние характеристик кругов и режимов шлифования на съем припуска с поверхности никелида титана

Fig. 2. Influence of wheel characteristics and grinding modes on stock removal from titanium nickelide surface

В центре плана ($A = 0; B = 0$), в котором количество повторений опытов $n = 3$, прослеживалась общая тенденция стабильного, но меньшего съема, чем в точке ($A = +1; B = +1$). Такое снижение m согласуется с поверхностной микротвердостью HV и отклонением от плоскостности Δ . При этом в отличие от других титановых сплавов заметное снижение съема металла оказывает положительный, а не отрицательный, как ожидалось, эффект. В этом случае отмечается лучшая точность формы поверхности до $\Delta = 2\text{--}5$ мкм без краевых дефектов. Учитывая, что в центре плана такое наблюдение отмечено только в одном из трех опытов, было решено увеличить дублирование наблюдений. Была поставлена задача определить режимы шлифования, при которых съем металла заметно ниже, а точность формы выше, чем в остальных опытах. Для установления этого план ПФЭ 2^2 был дополнен опытами со следующими сочетаниями уровней факторов: $A;B = [-1;-0,5], [-0,5;-1], [0;-1], [0;-0,5]$ для круга $i = 1$. Отмечено, что в перечисленных опытах описанная закономерность соблюдается. При этом съем повышался с увеличением обеих подач S и $S_{\text{п}}$ вместе. Однако изменение величины продольной подачи S оказывалось менее заметно на съеме и точности формы, неже-

ли чем для поперечной S_{π} . Так, при $B = -0,5$ и различных уровнях фактора A изменение веса составило 0,44–0,53 г. При этом погрешность формы составила $\Delta = 18 \pm 2$ мкм. Тогда как для $B = -1$ погрешность не превысила 6 мкм при таком же съеме припуска.

Сказанное связано с явлением накопления тепла в детали, которое было выявлено по вектору S_{π} от начала многопроходного рабочего хода и до выхода за поперечный габарит заготовки [15]. Можно предположить, что при увеличении количества продольных ходов возрастает количество аккумулируемой теплоты резания, что приводит к структурно-фазовым превращениям и в поверхностном слое образуется хорошо шлифуемый аустенит NiTi. За счет охлаждения поливом СОЖ прямо во время шлифования происходит поверхностная закалка, повышающая микротвердость. Отметим тот факт, что при шлифовании кругом 63CF60 K6V на режиме $A; B = [0; 0]$, $z = 0,1$ мм без охлаждения микротвердость была ниже.

Установив корреляционную связь, для дальнейшего изучения потребовалось построить регрессионную модель, что позволяет сделать ПФЭ. Автоматизация процедуры поиска статистической модели реализована на базе программы *Stat-Ease Design-Expert 11 Demo*, в которой получены регрессии дисперсионного анализа (ДА) с постоянными факторами.

При реализации однофакторных экспериментов было выявлено, что влияние характеристики абразивного инструмента на микротвердость поверхности аппроксимируется линейной зависимостью. Это подтверждено и на стадии анализа данных наблюдений в ходе текущего исследования. Для всех трех экспериментов построены диаграммы рассеяния от каждого управляемого фактора и определена корреляция. Отметим, что наиболее стабильная связь между микротвердостью и предикторами выявлена в эксперименте для $i=3$ с наибольшими зернистостью и пористостью. Как видно из **рис. 3**, наблюдается средняя сила связи и отрицательная корреляция с доминированием влияния подачи S_{π} .

Коэффициенты корреляции для всех абразивных кругов приведены в **табл. 4**.

Таблица 4. Коэффициент корреляции между микротвердостью и параметром обработки шлифованием

Table 4. Correlation coefficient between microhardness and grinding processing parameter

Абразивный круг	Задающая переменная	Коэффициент корреляции
63CF60 K6 V	S	-0,166
	S_{π}	-0,417
37C60 K12 VP	S	-0,729
	S_{π}	-0,236
08C046 I12 V01P2	S	-0,594
	S_{π}	-0,638

Анализируя **табл. 4**, можно констатировать факт, что более крупное абразивное зерно шлифовального круга и высокая пористость способствуют проявлению главных эффектов на поверхностную микротвердость. В этом случае коэффициент корреляции больше, особенно для поперечной подачи, где превышение составило 1,5–2,7 раза. Невысокие значения коэффициентов корреляции для круга 63CF60 K6 V позволяют утверждать о преимуществе обычной пористости, так как область допустимых оптимальных режимов может быть расширена благодаря зависимости с меньшим изменением микротвердости HV.

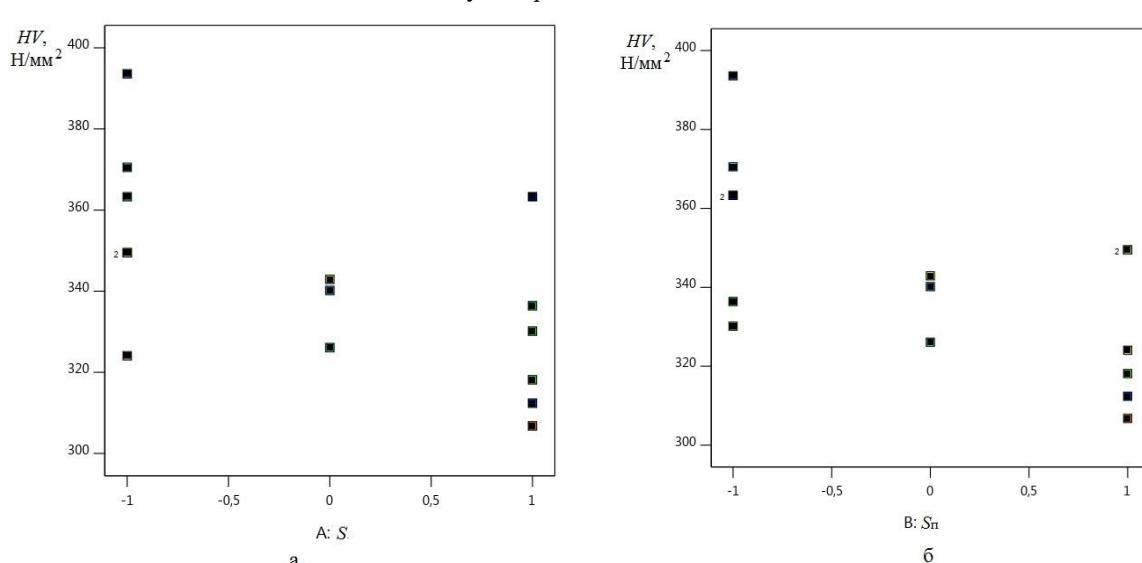


Рис. 3. Диаграмма рассеяния показателя микротвердости HV при шлифовании кругом $i = 3$ на уровнях факторов:
а – для продольной подачи S ; б – для поперечной подачи S_{π}

Fig. 3. Scatter diagram of microhardness index HV when grinding with $i = 3$ wheel at factor levels: a is for longitudinal feed S ; б is for cross feed S_{π}

Для ПФЭ 2^2 модели представлены полиномами первого порядка, так как возможна оценка только главных эффектов (A, B) и эффекта взаимодействия AB . Для большей наглядности выполнен Парето-анализ, представленный на рис. 4, для абразивного инструмента $i = 1$ и $i = 3$, на котором указаны критические значения критерия Стьюдента.

Основные эффекты проверены на 5%-м уровне значимости по F -критерию и представлены в табл. 5. Также оценивалась значимость суммы квадратов несоответствия, являющаяся частью дисперсии остатков. На этом этапе проводилась оценка моделей, рассчитывались коэффициенты детерминации – прогнозируемый и скорректированный, с поправкой на количество членов модели. Их разница должна быть не более 0,2. Данные модели микротвердости поверхности при шлифовании никелида титана значимы и

адекватны. Их математические выражения представлены в табл. 5. Отметим невысокую величину коэффициента детерминации R^2 при круге $i = 1$, что свидетельствует о наличии отдельных наблюдений, не объяснимых предсказанной моделью.

Члены регрессионного уравнения получены на базе оценок по методу наименьших квадратов. Также вычислен показатель D_{FFITS} для каждого опыта, являющегося стьюдентизированной разницей между прогнозируемым значением с j -м наблюдением и прогнозируемым значением без j -го наблюдения. Таким образом проверялась подгонка регрессионной модели к опытным результатам, позволяющая добиться более точного математического описания поверхности отклика. Полученные D_{FFITS} свидетельствуют о хорошем совпадении средних наблюдений с величинами, предсказанными по моделям ДА.

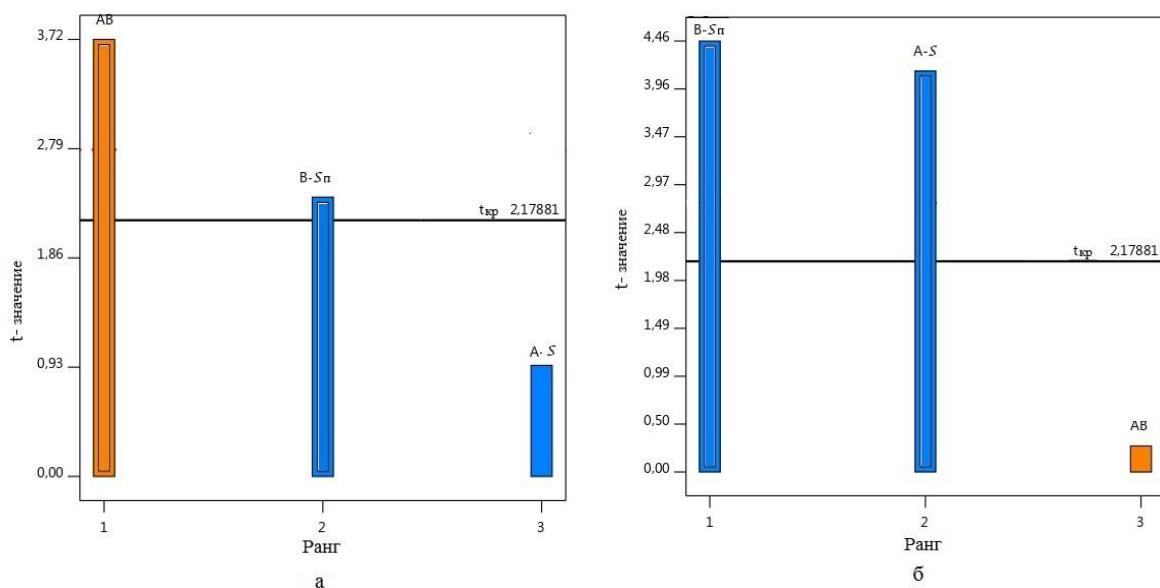


Рис. 4. Парето-анализ эффектов на поверхность микротвердость HV при шлифовании кругами:
а – 63CF60 K6V; б – 08C046 I12 V01P2

Fig. 4. Pareto analysis of the effects on surface microhardness HV during wheel grinding:
a is 63CF60 K6V; б is 08C046 I12 V01P2

Таблица 5. Результаты ДА и регрессии для поверхностной микротвердости HV в зависимости от изучаемых характеристик абразивного инструмента

Table 5. ANOVA and regression results for surface microhardness HV depending on the studied characteristics of the abrasive tool

Параметры	Характеристика абразивного инструмента		
	63CF60 K6 V ($i=1$)	37C60 K12 VP ($i=2$)	08C046 I12 V01P2 ($i=3$)
Расчетный уровень p для ДА (значима при $p < 0,05$)			
$A: S$	0,3882	0,001	0,0012
$B: S_n$	0,0418	0,1724	0,0007
AB	0,0039	0,061	0,7983
Регрессионный анализ			
R^2	0,5318	0,5979	0,7206
Предсказанный R^2	0,3482	0,4580	0,61
Регрессионное уравнение	$HV=337,08-8,908B+13,942AB$	$HV=335,44-14,584-7,00AB$	$HV=341,79-15,27A-16,41B$
D_{FFITS}	Не превышает допустимую		

Приведенные результаты по планам ПФЭ 2^2 для исследуемых характеристик абразивного инструмента при варьировании режимов шлифования позволили сформулировать выводы. Благодаря сравнительно сильному влиянию пористости при увеличенной зернистости на формируемый тепловой поток, только для круга $i = 3$ в модель вошли оба непосредственно воздействующих фактора A и B (см. табл. 5). Для характеристик инструментов $i = 1$ и $i = 2$ их влияние смешано с взаимодействием AB . При этом для круга $i = 2$ взаимодействие на грани допустимости включения в модель ($p = 0,06 > 0,05$). Как следствие, для круга $i = 3$ значимость основных факторов наибольшая по сравнению с другими результатами ДА. В результате предсказано более точное уравнение, о чем свидетельствует коэффициент $R^2 = 0,72$, для других характеристик инструментов $i = 1, 2$ они ниже соответственно 0,53 и 0,6. Для всех полученных регрессионных моделей разница при сопоставлении рассчитанных коэффициентов детерминации меньше 0,2, подтверждая правильность построения модели. Регрессионные модели приведены в нормированном виде, позволяя оценить вклад каждого члена уравнения в контролируемую изменчивость поверхностной микротвердости. Отметим отрицательные знаки при коэффициентах основных эффектов во всех моделях. Это влияние подтверждается теплофизикой процесса шлифования: при увеличении подач время воздействия теплового источника в зоне контакта абразивный круг-деталь на поверхность уменьшается. Так как именно повышение микротвердости спо-

собствует улучшению абразивной обработки нитинола, то в первую очередь необходимо снизить подачи при шлифовании, а также использовать повышенную из сравниваемых зернистость $F46$, о чем свидетельствует увеличение свободного коэффициента до 341,79 HV для круга $i = 3$.

Для анализа полученных математических закономерностей предсказаны поверхности откликов (рис. 5). Наличие информации о поверхностях откликов позволяет среди возможных комбинаций технологических параметров отыскать такие, которые соответствуют целевым показателям процесса шлифования. Как видно из них, наибольшее значение микротвердости отмечается при самом непроизводительном режиме шлифования: $A = B = -1,00$, при котором гарантируется фазовое превращение в поверхностном слое и переход мартенсита NiTi в аустенит. В то же время для повышения производительности процесса можно увеличить продольную подачу до $A = -0,5$, так как при этом отмечается небольшое снижение прогнозируемого показателя HV на 8 H/mm² (рис. 5, б). Компенсировать такое снижение можно увеличением размеров зерен круга. Повышать S_n не рекомендуется, так как возможно большее снижение микротвердости. Наибольшие различия микротвердости прогнозируются для круга $i = 1$ при $A:B = [-1; 1]$, где снижение составляет 10–13%, а для круга $i = 3$ в точке $A = B = +1$ поверхностная микротвердость HV меньше на 20 H/mm².

Таким образом определено возможное изменение фазы NiTi за счет теплоты резания при шлифовании.

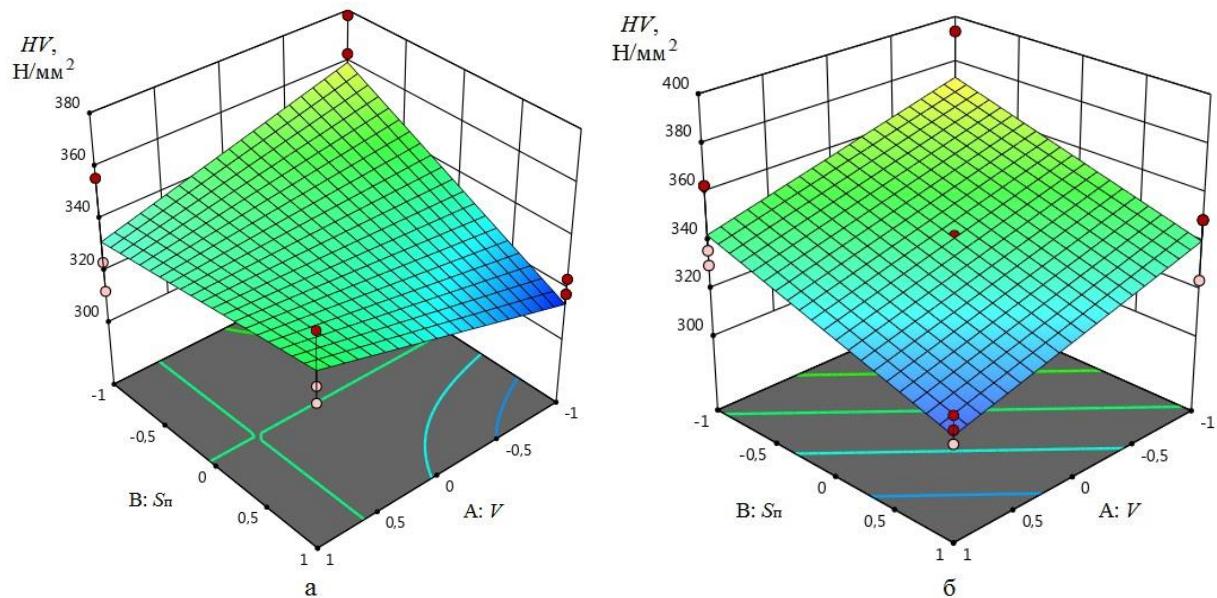


Рис. 5. Влияние продольной и поперечной подач на поверхностную микротвердость HV при шлифовании кругами материала TH-1: а – 63CF60 K6V; б – 08C046 I12 V01P2

Fig. 5. The influence of longitudinal and cross feeds on the surface microhardness HV when grinding TN-1 material with wheels: а is 63CF60 K6V; б is 08C046 I12 V01P2

С целью проверки наличия благоприятного эффекта термического упрочнения на обрабатываемость никелида титана был проведен дополнительный эксперимент. Исследовалось влияние плазменного упрочнения и расстояния от сопла плазматрона до поверхности заготовки на качественные и количественные характеристики получаемой поверхности после шлифования. Обработку торца вали плазмой на установке *Herocut HC 3500AF* вручную со скоростью 8–10 мм/с по сетчатой траектории, размеченной с шагом 10 мм, по 3 хода в каждом ортогональном направлении (рис. 6). Время между ходами 5 с. Параметры работы плазменной установки: ток электродугового разряда – 10 А, диаметр сопла – 0,6 мм. Расстояние от сопла до детали l были 20, 16,5 и 13 мм и задавались насадками на плазмотрон разной длины, будем характеризовать это длиной факела. Нагретые заготовки закаливали в воде при комнатной температуре путём погружения на 1 мин.



Рис. 6. Технологическое обеспечение обработки поверхности плазмой

Fig. 6. Technological support for plasma surface treatment

В ходе обработки отмечено, что с уменьшением расстояния от сопла до поверхности увеличиваются следы воздействия высоких температур. На поверхности, обработанной при $l = 13$ мм, заметны прижоги и следы побежалостей, которые соответствуют более сильному воздействию плазмы.

После закалки в воде образцы шлифовались кругом *Norton 37C46 I12 VP* высокой пористости на режиме: $S = 8$ м/мин, $S_n = 4$ мм/дв. ход, $t = 0,01$ мм, количество ходов – 10. Были определены отклонения от прямолинейности как разница между выявленной прилегающей прямой и отклонениями в пяти точках, в частности в центре 0 и по окружностям 1 и 2 (по $D/2$ и D соответственно), измеренными по 4-м сечениям, при этом $0\text{--}180^\circ$ соответствовало вектору S_n (рис. 7).

Дополнительно оценивалась плоскостность, величины отклонения которых указаны в табл. 6.

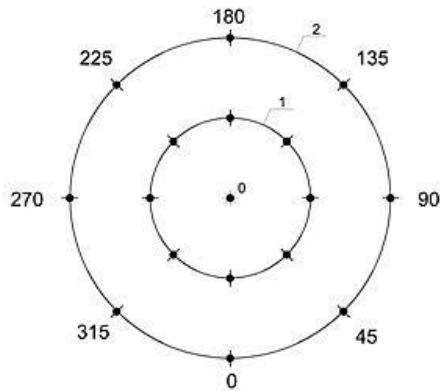


Рис. 7. Схема измерения погрешности формы на детали в полярной системе координат

Fig. 7. Scheme for measuring shape error on a part in a polar coordinate system

Таблица 6. Отклонения от прямолинейности и плоскостности образцов после шлифования поверхности никелида титана, термоупрочненного плазмой

Table 6. Deviations from straightness and flatness of samples after grinding the surface of titanium nickelide after heat-strengthened by plasma

Длина факела, мм	Отклонения формы: непрямолинейность и неплоскостность, мкм		
	Минимальное Δ_{min}^{np}	Максимальное Δ_{max}^{np}	Δ
13	6	12	11
16,5	7	14	7
20	9	22	16

Отклонения от прямолинейности изменяются от 6 до 22 мкм, причем меньшие значения характерны для поверхности, обработанной с меньшей длиной факела, и измеренные по вектору поперечной подачи S_n , а большие соответственно для максимальной длины факела по вектору продольной подачи S . Элементарные погрешности формы были как в виде выпуклости, так и вогнутости, но несравнимо меньшие по сравнению с нетермообработанными заготовками, что показано на фото образцов на рис. 8. При этом не обработанные плазмой поверхности никелида титана после шлифования имели четко выраженный псевдорегулярный макрорельеф по краям (желоб по ГОСТ Р ИСО 25178-2) от движения круга по вектору S (рис. 8, а). Доказано, что при уменьшении расстояния между шлифуемой поверхностью и соплом плазматрона увеличивается количество фазы аустенита и ее глубина после термической обработки плазмой, что повлияло на погрешность формы. Сказанное связано с возрастанием температуры плазмы, действующей на поверхность, глубины и температуры нагрева поверхности детали из интерметаллида ТН-1. При охлаждении в воде увод тепла в сердцевину образца затруднен из-за коэффициента теплопроводности, который у мартенсита в

два раза меньше, чем у аустенита, а следовательно, в основном только на поверхности, подвергаемой абразивной обработке, наблюдается фазовый переход мартенсит \rightarrow аустенит. Но так как припуск шлифования одинаковый, а глубина поверхностного слоя с закаленной фазой разная, то это сказалось на результате шлифования. Это подтверждается различными видами элементарной погрешности плоскостей – выпуклости, характерной аустениту, и вогнутости, свойственной мартенситу [12]. При возросшей длине факела температура становится недостаточной для прогрева поверхностного слоя металла на глубине 0,1 мм выше критической точки, характерной для данного обрабатываемого состава ТН-1. В результате при закалке не удается получить устойчивой фазы аустенита в подповерхностном слое с залеганием по глубине, сопоставимой с припуском. Кроме того, выпуклость объясняется тем, что на краях детали по естественным причинам хуже отводится теплота резания, чем в сердцевине, а значит, и температурное расширение больше. Следовательно, на локальных краевых участках иная интенсивность срезания припуска. Косвенно

сказанное подтверждается различием микротвердости HV после шлифования термоупрочненных поверхностей ТН-1. Так, микротвердость в среднем составила HV = 336 Н/мм² для поверхностей, обработанных плазмой с l = 20 мм, что на 6% меньше для поверхностей, обработанных плазмой с l = 13 мм при средней величине HV = 355 Н/мм².

Для проверки гипотезы о связи погрешности формы поверхности с величиной припуска под шлифование и фазовыми превращениями по глубине термоупрочненного слоя был выполнен эксперимент. Для этого с деталей сняли еще дополнительный припуск z=0,1 мм, после чего повторно измерили погрешность формы и микротвердость. Отмечено, что при снятии дополнительного припуска микротвердость уменьшилась, что отражено в табл. 7, а значит, повышается количество мартенситной фазы в подповерхностном слое с ростом глубины. Для образца, обработанного с факелом l = 20 мм, величина микротвердости снизилась до исходного значения в состоянии поставки, равной HV 290 Н/мм².

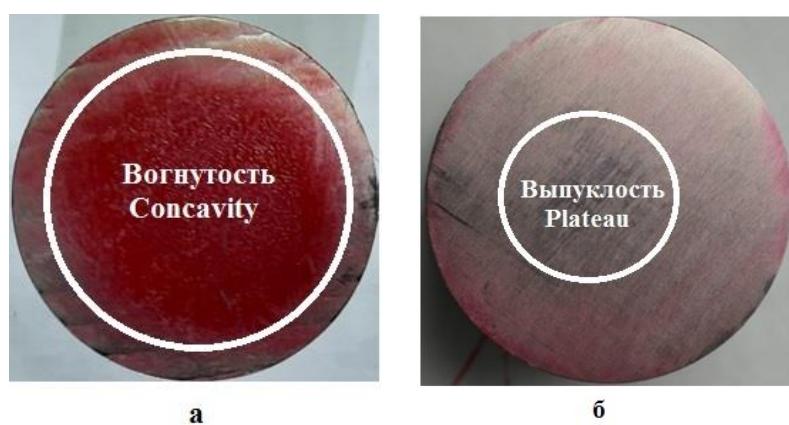


Рис. 8. Фото образцов после индикации отклонения от плоскости методом «на краску», обработанных шлифованием: а – без плазменного упрочнения; б – с плазменным упрочнением при l = 13 мм

Fig. 8. Photos of samples after indicating deviations from flatness using the surface imprint method, processed by grinding: a is without plasma hardening, б is with plasma hardening at l=13 mm

Таблица 7. Результаты изменения характеристик микротвердости и точности поверхности ТН-1 при шлифовании с различными припусками

Table 7. Results of changes in the characteristics of microhardness and surface accuracy of TN-1 during grinding with different allowance

Длина факела l, мм	Точка	Основной припуск z=0,1 мм		Дополнительный припуск z=0,1 мм		
		HV, Н/мм ²	Средняя HV, Н/мм ²	HV, Н/мм ²	Средняя HV, Н/мм ²	Отклонение от плоскости Δ , мкм
13	1	330	355	307	321	18
	2	386		349		
	3	349		307		
16,5	1	324	338	343	308	17
	2	363		285		
	3	328		296		
20	1	312	336	287	289	29
	2	318		276		
	3	378		306		

Сопоставляя полученные отклонения формы после шлифования (см. табл. 7), отметим, что при снятии дополнительного припуска количественные характеристики плоскости и прямолинейности заметно ухудшаются, они возросли минимум в два раза. Так, значение погрешности $\Delta = 7 \text{ мкм}$ после снятого шлифованием дополнительного припуска возросло до 17 мкм , а при $\Delta = 16 \text{ мкм}$ – до 29 мкм . Также поменялись и отклонения от прямолинейности. На рис. 9 представлены профили прямолинейности образцов и прилегающая прямая по двум сечениям – $0-180^\circ$ и $45-225^\circ$. Представленные погрешности соответствуют шлифованным поверхностям TH-1 с предварительным упрочнением плазмой при длине факела $l = 13 \text{ мм}$.

Такая же картина получена и для $l = 16,5 \text{ мм}$ и $l = 20 \text{ мм}$ в тех же сечениях, отражающих влияние поперечной подачи S_n на изменение физико-механических характеристик TH-1 в процессе шлифования. Для других сечений картина выражена не явно. Сравнивая полученные фотографии и прямолинейность профиля после шлифования общего припуска $z = 0,2 \text{ мм}$ и $z = 0,1 \text{ мм}$, отметим, что при снятии дополнительного припуска исходная погрешность типа выпуклость переходит в вогнутость. Это достаточно достоверно подтверждает изменение фаз по глубине никелида титана, термоупроченного плазмой с аустенита до мартенсита. Шлифование таких поверхностей стабильно обеспечивает точность обрабатываемой поверхности.

Заключение

1. Шлифование никельтитановых сплавов в состоянии мартенсита сопряжено рядом трудностей, в частности при шлифовании достаточно сложно обеспечить точность формы и опорную способность поверхности благодаря особым свойствам металла с эффектом памяти формы. Наряду с этим данный сплав легко подвергается абразивной обработке без значительных макроотклонений в аустенитном состоянии. Поэтому предложено искусственно превращать поверхностный слой из фазы мартенсита в аустенит. При этом такого превращения решено добиваться во время его шлифования при особых условиях и режиме, а также путем предварительного плазменного упрочнения перед абразивной обработкой. Обнаружено, что обработка никелида титана обладает ранее неизвестным исключением. Так, умозаключение, что большой съем или объемная производительность резания связаны с хорошей обрабатываемостью, не свойственно этому металлу. Наоборот, для NiTi это показатель того, что он находится в состоянии плохо поддающейся абразивной обработки. Малый съем материала в единицу времени говорит о физико-механических характеристиках, благоприятных для шлифования, но не лезвийной обработке.

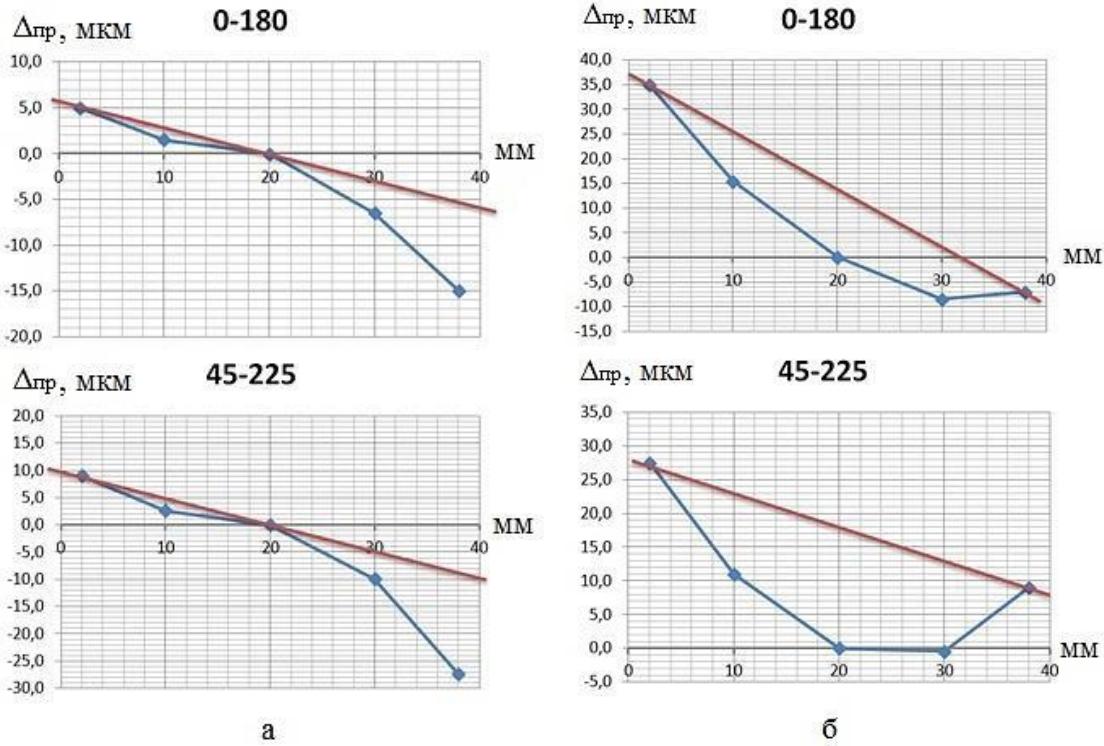


Рис. 9. Профили поверхности и отклонения от прямолинейности от прилегающей прямой для двух сечений после технологического маршрута «плазменное упрочнение – закалка – шлифование» при снятии припуска: а – $z = 0,1 \text{ мм}$; б – $z = 0,2 \text{ мм}$

Fig. 9. Surface profiles and deviations from straightness from the adjacent straight line for two sections after “plasma hardening - grinding” when removing the allowance: а is $z=0,1 \text{ mm}$; б is $z=0,2 \text{ mm}$

2. На основании выявленной связи микротвердости HV и особенностей шлифования фаз NiTi установлено, что вынужденного структурно-фазового превращения «мартенсит – аустенит» можно добиться только кругами, при обработке которыми возникают достаточные тепловыделения в зоне резания. В рамках данного исследования это продемонстрировали абразивные круги 63F60 K6 V, которые меньше других зависят от применяемых режимов шлифования. Для большего положительного эффекта рекомендовано выбирать абразивные круги из карбида кремния, по возможности большей зернистости при нормальной пористости. Кроме того, для стабилизации данных явлений в никелиде титана обработка должна вестись при обильной подаче СОЖ, что приводит к положительной вторичной закалке. Для этого необходимо выставлять достаточные для температурных превращений времена на перебеги и врезание. Стабильное фазовое превращение при шлифовании возможно только для продольной подачи S , не превышающей 5 м/мин. Поперечная подача должна принимать минимальные значения. Обусловлено это временем контакта «абразивный инструмент – деталь», возрастание которого способствует достижению определенной температуры резания и аккумуляции тепла в подповерхностном слое, необходимых для инициации фазового перехода. Применение шлифования с большими значениями ведет к нарушению этого явления из-за меньших температур резания и естественной теплоотдачи.

3. Корреляционный анализ показал зависимость между повышенной микротвердостью, свойственной фазам аустенита, со съемом припуска, обеспечивающим наивысшую точность процесса формирования плоскости. Впервые полученная трехкомпонентная диаграмма позволяет утверждать о положительном эффекте наклела на обрабатываемость никелида титана в мартенситном состоянии. Так, наименьшая погрешность формы была получена при поверхностной микротвердости HV более 350 Н/мм² и составила в среднем 5 мкм, что в 6 раза меньше, чем при обработке при шлифовании поверхности с наклепом до HV = 340 Н/мм².

4. По результатам проведенного регрессионного анализа определено значимое влияние поперечной подачи $S_{\text{п}}$ при шлифовании на поверхностную микротвердость. Уменьшение $S_{\text{п}}$ способствует эффекту нагрева поверхности до накопления теплоты до фазового превращения за счет возрастающего количества проходов. Рекомендовано минимальное значение $S_{\text{п}} = 2$ мм/дв. ход, что, соответственно, ведет к потере производительности. В то же время для повышения производительности процесса можно увеличить продольную подачу S до 5 м/мин, так как она оказывает меньшее влияние на изученную характеристику поверхности. Полученные регрессионные модели проверены на адекватность.

5. Установлен благоприятный эффект термического упрочнения на обрабатываемость никелида титана путем реализации технологического маршрута «плазменное упрочнение – закалка в воде – шлифование поверхности». Косвенно она подтверждена наблюдениями за опорной площадью поверхности и видом погрешности формы. Обнаружено, что локальный плазменный нагрев приводит к мартенситно-аустенитному переходу, а быстрое охлаждение в воде останавливает его обратимость. Аустенитная фаза – незначительная по глубине поверхностного слоя и не превышает 0,2 мм. В зависимости от припуска шлифования и параметров предварительного термического упрочнения получены погрешности формы до 7 мкм. Это дает возможность достичь хороших показателей точности, свойственных аустениту при сохранении исходных свойств для детали, характерных мартенситу. Заметно повышается опорная способность поверхности после шлифования за счет формирования плато, переходящего в выпуклость.

6. Доказано, что при уменьшении расстояния между поверхностью и соплом плазматрона увеличивается количество фазы аустенита и ее глубина, подтверждаемые изменением микротвердости. Так, при длине факела 13 мм HV возросла на 20%. Глубина измененной микротвердости недостаточна при обработке плазмой с факелом более 20 мм.

7. В качестве рекомендаций для производства можно предложить следующие. Так как обработка плазмой – более универсальный метод по сравнению с многопроходным шлифованием, позволяющая обрабатывать большие площади поверхности разной кривизны, то подготавливать детали из никелида титана необходимо плазменным упрочнением, получая поверхностный слой из аустенита, а шлифование производить на производительных режимах, в том числе и чашеобразным кругом. Данный маршрут будет особенно востребован в серийном производстве. При этом процесс плазменной обработки еще и легко автоматизируется для многономерного производства. Для единичного производства рекомендуется абразивная обработка шлифованием с подачей СОЖ и заданием режимов, способствующих устойчивому фазовому переходу на всех проходах по глубине шлифования, так как обладает меньшими себестоимостью и коротким маршрутом обработки.

Список источников

1. Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите «сталь – сплав TiNi», полученном сваркой взрывом / Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник (мл.) В.В., Рубаник О.Е. // Металловедение и термообработка металлов. 2010. № 9. С. 30–34.
2. Сенкевич К.С. Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинола: обзор // Известия

- вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. №4. С. 72-78.
3. Soler Y., Kazimirov D. A note on the change in the surface quality characteristics during flat grinding of titanium intermetallic with shape memory effect // Key Engineering Materials. 2022, vol. 910, pp. 9-16.
 4. Superelastic and superplastic alloys – problem 2008 year. Open Course Ware. Available at: <https://ocw.mit.edu/courses/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/> pages/ projects/superelastic_5 (Accessed January 15, 2024).
 5. Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions / Emre Altas, Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya and Yuksel Akinay // Journal of Materials Engineering and Performance. 2021, vol. 30, pp. 9426-9439.
 6. Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy // Procedia CIRP. 2016, vol. 45 (Supplement C), pp. 207-210.
 7. Yi Yi Tao, Jiu Hua Xu, Wen Feng Ding. A study on grinding performance of porous NiTi shape memory alloy. Key Engineering Materials. 2008, vols. 359-360.
 8. Grinding the sharp tip in thin NiTi and stainless steel wires / Yancheng Wang, Bruce L. Tai, Mackenzie Van Loon, Albert J. Shih // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012, vol. 62, pp. 53-60.
 9. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels / Xin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jiuhua Xu // Precision Engineering. 2018, vol. 53.
 10. Characterization of mechanical properties of an alloy with shape memory – nitinol / Oliveira T. S., Procópio L. S., Martins P. H. A., de Castro U. D., et al. // COBEM. 23rd ABCM Int. Congr. of Mechanical Engineering Rio de Janeiro. 2015.
 11. Soler Y. I. and Kazimirov D. Yu. Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1218-1233.
 12. Kaya E. and Kaya I. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 100, pp. 2045-2087.
 13. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Метляев И.А. Повышение эффективности шлифования деталей из материалов с эффектом памяти формы // Вестник современных технологий. 2019. №1(13). С.12-18.
 14. Гуляев А.П. Материаловедение: учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986.
 15. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Моделирование теплофизики плоского шлифования деталей летательных аппаратов в MSC. Marc/Mentat // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. №5. С. 56-62.
 16. Characterisation of microstructure and mechanical properties of linear friction welded $\alpha+\beta$ titanium alloy to nitinol / Ateekh U. Rehman, Nagumothu K. Babu, Mahesh K. Talari, Yusuf Usmani and Hisham Alkhalefah // Applied Sciences. 2021, vol. 11, 10680.
 17. Temperature and strain rate dependent stress-strain behaviour of nitinol / Mahesh K. Gupta, Akash Shankhdhar, Abhinav Kumar, Anant Vermon, et al. // Materials Today Proceedings. 2021, vol. 43, pp. 395-398.
 18. Adebayo A. Adeleke, Yansun Yao. High-temperature shape memory loss in nitinol: a first principles study // Physical Chemistry Chemical Physics. 2019, vol. 21(14), pp. 7508-7517.

References

1. Belyaev S.P., Rubanik V.V., Resnina N.N., Rubanik (ml.) V.V., Rubanik O.E. Effect of annealing on martensitic transformations in a bimetallic composite “steel - TiNi alloy” obtained by explosion welding. *Metallovedenie i termoobrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2010;(9):30-34. (In Russ.)
2. Senkevich K.S. Prospects for the production and application of hybrid structures and composites from titanium alloys and nitinol: review. *Izvestiya vuzov. Poroшkovaya metallurgiya i funkциональные покрытия* [News from universities. Powder metallurgy and functional coatings], 2017;(4):72-78. (In Russ.)
3. Soler Y., Kazimirov D. A note on the change in the surface quality characteristics during flat grinding of titanium intermetallic with shape memory effect. Key Engineering Materials. 2022;910:9-16.
4. Superelastic and superplastic alloys - problem 2008 year. Open Course Ware. Available at: <https://ocw.mit.edu/courses/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/> pages/ projects/superelastic_5 (Accessed January 15, 2024).
5. Emre Altas, Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya and Yuksel Akinay. Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021;30:9426-9439.
6. Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy. Procedia CIRP. 2016;45(C):207-210.
7. Yi Yi Tao, Jiu Hua Xu, Wen Feng Ding. A study on grinding performance of porous NiTi shape memory alloy. Key Engineering Materials. 2008;359-360.
8. Yancheng Wang, Bruce L. Tai, Mackenzie Van Loon, Albert J. Shih. Grinding the sharp tip in thin NiTi and stainless steel wires. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;62:53-60.
9. Xin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jiuhua Xu. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide

- and alumina abrasive wheels. Precision Engineering. 2018;53.
10. Oliveira T. S., Procópio L. S., Martins P. H. A., de Castro U. D., et al. Characterization of mechanical properties of an alloy with shape memory - nitinol. COBEM. 23rd ABCM Int. Congr. of Mechanical Engineering Rio de Janeiro (2015).
11. Soler Y. I. and Kazimirov D. Yu. Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020;15(11):1218-1233.
12. Kaya E. and Kaya I. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;100:2045-2087.
13. Soler Ya. I., Kazimirov D. Yu., Metlyaeve I. A. Increasing the efficiency of grinding parts made of shape memory materials. *Vestnik sovremennoy tekhnologiy* [Bulletin of modern technologies], 2019;1(13):12-18. (In Russ.)
14. Gulyaev A.P. *Materialovedenie: ucheb. dlya vuzov. 6-e izd. pererab. i dop.* [Materials Science: 6th edition, reprinted and added]. Moscow: Metallurgiya, 1986. (In Russ.)
15. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Modeling the thermal physics of surface grinding of aircraft parts in MSC. Marc/Mentat. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2005;(5):56-62. (In Russ.)
16. Ateekh U. Rehman, Nagumothu K. Babu, Mahesh K. Talarai, Yusuf Usmani and Hisham Alkhalefah. Characterisation of microstructure and mechanical properties of linear friction welded $\alpha+\beta$ titanium alloy to nitinol. Applied Sciences. 2021;11:10680.
17. Mahesh K. Gupta, Akash Shankhdhar, Abhinav Kumar, Anant Vermon, et al. Temperature and strain rate dependent stress-strain behaviour of nitinol. Materials Today Proceedings. 2021;43:395-398.
18. Adebayo A. Adeleke, Yansun Yao. High-temperature shape memory loss in nitinol: a first principles study. Physical Chemistry Chemical Physics. 2019;21(14):7508-7517.

Поступила 29.05.2024; принята к публикации 29.10.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 29/05/2024; revised 29/10/2024; published 24/12/2024

Казимиров Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.

Email: kazimirdenn@gmail.com. ORCID 0000-0001-6438-1525

Солер Яков Иосифович – кандидат технических наук, профессор,

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.

Email: solera@istu.irk.ru. ORCID 0000-0001-5109-3268

Denis Yu. Kazimirov – PhD (Eng.), Associate Professor,

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Email: kazimirdenn@gmail.com. ORCID 0000-0001-6438-1525

Yakov I. Soler – PhD (Eng.), Professor,

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Email: solera@istu.irk.ru. ORCID 0000-0001-5109-3268