



## РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Кременецкий Л. Л. ORCID ID 0000-0002-6973-5844, Меньшиков Д. П.

*Волжский политехнический институт (филиал) федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»,  
Волжский, Российская Федерация, e-mail: kreonid@yandex.ru*

Целью исследования является анализ морфологии и элементного состава поверхности титанового сплава Ti6Al4V при глубинном шлифовании на различных скоростях продольной подачи. Обработку осуществляли кругом из карбида кремния зеленого на специализированном станке для глубинного шлифования. Рентгено-спектральные исследования шлифованной поверхности проводили с применением сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что морфология поверхности изменяется по длине заготовки и определяется номинальной мгновенной режущей способностью. Наибольшая интенсивность когезионного процесса наблюдается на этапе постоянной длины дуги контакта. Изменение скорости продольной подачи заметно влияет на микро-рельеф, формируемый на этапе постоянной длины дуги контакта, так как возрастает интенсивность переноса наливов металла на поверхность Ti6Al4V. Доказано, что процесс шлифования сопровождается переносом частиц абразива на обрабатываемую поверхность, интенсивность переноса зависит от этапа глубинного шлифования. Содержание кремния на поверхности Ti6Al4V, сформированной на этапе выхода больше, чем на поверхности, соответствующей этапу постоянной длины дуги контакта. Установлено, что увеличение скорости продольной подачи способствует снижению интенсивности переноса материалов шлифовального круга на обрабатываемую поверхность ввиду уменьшения временной продолжительности этапов глубинного шлифования.

**Ключевые слова:** глубинное шлифование, титановый сплав, карбид кремния, скорость продольной подачи, элементный состав, морфология поверхности

## X-RAY SPECTRAL ANALYSIS OF TITANIUM ALLOY AT CREEP-FEED GRINDING WITH DIFFERENT LONGITUDINAL FEED RATE

Kremenetskiy L. L. ORCID ID 0000-0002-6973-5844, Menshikov D. P.

*Volzhsky Polytechnic Institute (branch). Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education "Volgograd State Technical University", Volzhskiy, Russian Federation,  
e-mail: kreonid@yandex.ru*

The aim of this study was to analyze the morphology and elemental composition of the surface of Ti6Al4V titanium alloy after creep-feed grinding at various table feed rates. The grinding was performed using a green silicon carbide wheel on a specialized machine. X-ray spectral analysis of the machined surface was performed using scanning electron microscopy. It has been established that surface morphology changes along the workpiece length and is determined by the nominal instantaneous cutting ability. The highest intensity of the cohesive process is observed at the stage of constant length of arc. Varying the longitudinal feed rate significantly affects the microrelief formed at the stage of constant length of arc as well as increasing the transfer of metal deposits to Ti6Al4V surface. It has been proven that the grinding process is accompanied by the transfer of abrasive particles to machined surface, the intensity of which depends on grinding stage. The silicon amount on the Ti6Al4V surface formed at the stage of exit is greater than on the surface corresponding to stage of constant length of arc. It has been established that increasing the longitudinal feed rate helps to reduce the intensity of grinding wheel material transfer to machined surface due to reduction of stage time duration.

**Keywords:** creep-feed grinding, titanium alloy, silicon carbide, table feed, elemental composition, surface morphology

### Введение

Современное развитие авиастроения, ракетно-космической техники и энергетического машиностроения неразрывно связано с применением титановых сплавов. Высокая коррозионная стойкость и жаропрочность делают эти материалы незаменимыми при изготовлении ответственных деталей, работающих в условиях экстремальных нагрузок. Однако комплекс физико-механических свойств титановых сплавов, включающий низкую теплопроводность и высокую адгезионную активность к материалу ре-

жущего инструмента, обуславливает значительные технологические трудности механической обработки.

Одним из наиболее перспективных и высокопроизводительных методов получения деталей из титановых сплавов является глубинное шлифование (ГШ). ГШ применяется при обработке замков лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, деталей шасси и элементов гидравлических систем. Процесс получения деталей методом ГШ осложнен рядом факторов. Низкая теплопроводность титанового сплава способствует ло-

кализации теплового потока в зоне резания, что приводит к прижогам обрабатываемой поверхности и интенсивному износу зерен шлифовального круга. Также известно, что процесс шлифования титанового сплава сопровождается активным взаимопереносом материалов между инструментом и обрабатываемой заготовкой. Наличие микрочастиц абразива в поверхностном слое изделий нежелательно, так как они могут инициировать образование усталостных трещин при циклических нагрузках. При ГШ взаимоперенос материалов является одним из основных факторов, на данный момент осложняющих дальнейшее повышение производительности обработки сплавов на основе титана. Обеспечение процесса ГШ титановых сплавов требует комплексного подхода, включающего строгий выбор характеристик абразивного инструмента, применение постоянной правки этого инструмента алмазным роликом и оптимизацию режимов резания. Для ГШ титановых сплавов актуально использование кругов из карбида кремния благодаря оптимальному сочетанию высоких режущих свойств и экономической эффективности [1]. Современные разработки направлены на создание новых высокопористых, высокоструктурных кругов из карбида кремния зеленого, характеристики которых позволяют снизить тепловую напряженность процесса резания [2; 3]. Применение правящего алмазного ролика обеспечивает постоянное обновление рабочей поверхности шлифовального круга, предотвращая критический рост температуры в зоне контакта инструмента и заготовки [4]. Обеспечению эффективности ГШ также способствует использование специальных синтетических СОЖ для обработки жаропрочных титановых и никелевых сплавов, сталей [5; 6].

Ключевую роль в формировании поверхностного слоя требуемого качества при ГШ играет выбор оптимального режима резания. Обоснованное назначение глубины шлифования [7], скорости шлифования [8] и скорости продольной подачи [9] позволяет управлять балансом тепловых и силовых факторов, минимизируя риск возникновения прижогов и обеспечивая требуемую шероховатость поверхности. Ранее с использованием сканирующей электронной микроскопии было доказано, что состояние микрорельефа поверхностного слоя титанового сплава при ГШ зависит от скорости шлифования [8]. Установлено, что процесс ГШ титанового сплава кругами из карбида кремния сопровождается переносом на обрабатываемую поверхность абразивного материала – кристаллов карбида кремния [10]. Также было установлено, что интенсивность насыщения обрабатываемой

поверхности абразивным материалом увеличивается с ростом скорости шлифования. Очевидно, что использование сканирующей электронной микроскопии дает принципиально новое понимание состояния шлифованной поверхности при ГШ. Применение сканирующей электронной микроскопии позволяет проводить анализ микрорельефа и элементного состава поверхности с субмикронной точностью, что особенно важно при оценке изменений, вызванных интенсивным термомеханическим воздействием на металл в процессе ГШ. Ее применение позволяет не только выявить морфологические особенности и дефекты поверхности титанового сплава после абразивной обработки, но и устанавливать связь между технологическими параметрами обработки шлифованием и эксплуатационными характеристиками материала. В таком случае стоит предположить, что скорость продольной подачи при ГШ так же, как и скорость шлифования, может оказывать влияние на морфологию титанового сплава и интенсивность переноса кристаллов карбида кремния на его поверхность. Данные закономерности остаются малоизученными по настоящее время: опубликованные учеными заключения о переносе абразивного материала на Ti6Al4V при шлифовании кругами из карбида кремния даны только на основании анализа морфологии отдельных участков обработанной поверхности [11; 12].

**Цель исследования** – изучение морфологии и элементного состава шлифованной поверхности титанового сплава Ti6Al4V при различной скорости продольной подачи.

#### **Материалы и методы исследования**

Образцы из сплава Ti6Al4V обрабатывали на шлифовальном станке SLS 434 кругом из карбида кремния зеленого, характеристика инструмента 64CF100I12V. Данные режимов резания и правки приведены в табл. 1.

Порядок проведения исследования шлифованной поверхности с использованием сканирующей электронной микроскопии изложен в ранее опубликованной статье [8]. Исследование морфологии и элементного состава образцов после ГШ проводили на микроскопе для микрорентгеноспектрального анализа FEI Versa 3D DualBeam с параметрами: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 5,8–7,7 нА, время выдержки 30 с, тип детектора EDAX Apollo EDX, площадь анализа 0,8 мм<sup>2</sup>, 400 точек сканирования. Образцы подвергались предварительной подготовке – ультразвуковой очистке от технологических загрязнений в аппарате Elmasonic S-40H (частота ультразвука 37 кГц, продолжительность обработки 30 мин).

Таблица 1

## Режимы обработки методом ГШ

| Исходные данные                  | Характеристика |            |
|----------------------------------|----------------|------------|
|                                  | № 1            | № 2        |
| Режим                            |                |            |
| Скорость продольной подачи $v_s$ | 100 мм/мин     | 150 мм/мин |
| Глубина шлифования $t$           | 2 мм           |            |
| Скорость шлифования $v$          | 20 м/с         |            |
| Подача на правку $S_p$           | 1,2 мкм/об     |            |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

### Результаты исследования и их обсуждение

Исследования процесса обработки методом ГШ необходимо проводить с учетом этапов формообразования – этапа врезания и равному ему по величине этапа выхода, этапа постоянной длины дуги контакта (ПДДК) [13]. Протяженность и временная продолжительность этих этапов определяется параметрами режима резания (глубина шлифования, скорость продольной подачи), длиной обрабатываемой поверхности образца и радиусом шлифовального круга [14, с. 8]. В проведенной серии испытаний длина обрабатываемой поверхности образца равна 40 мм, радиус шлифовальных кругов – около 240 мм. Расчет номинальной мгновенной режущей способности  $q$  по длине шлифования для ГШ кругом прямого профиля выполнен согласно формулам, описанным в работе [14, с. 38]. При ГШ плоской поверхности кругом прямого профиля на этапе врезания закономерность изменения  $q$  следующая: возрастает от нуля до максимального значения в соответствии с ростом фактической глубины шлифования. С переходом на этап ПДДК  $q$  максимальна и постоянна – в проведенной серии испытаний при  $v_s = 100$  мм/мин  $q$  равна 3,33 мм<sup>2</sup>/с, при  $v_s = 150$  мм/мин  $q$  равна 5,0 мм<sup>2</sup>/с. На этапе выхода  $q$  снижается от максимального значения до нуля.

Таким образом, с увеличением  $v_s$  в 1,5 раза  $q$  возрастает в том же соотношении по всей длине шлифования.

Удаление материала начинается на этапе врезания. Обработанная поверхность при ГШ формируется на этапе ПДДК и этапе выхода, поэтому протяженность этапа врезания на рис. 1 показана в отрицательной области оси абсцисс.

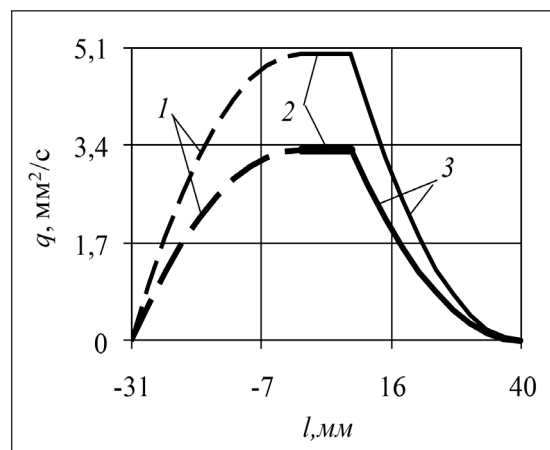


Рис. 1. Изменение номинальной приведенной мгновенной режущей способности  $q$  по длине шлифования  $l$ : 1 – этап врезания; 2 – этап ПДДК; 3 – этап выхода, —  $v_s = 100$  м/мин; - -  $v_s = 150$  м/мин.  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

## Протяженность и продолжительность этапов ГШ

| Этап ГШ  | Режим № 1          |        | Режим № 2          |        |
|----------|--------------------|--------|--------------------|--------|
|          | $v_s = 100$ мм/мин |        | $v_s = 150$ мм/мин |        |
|          | $L$ , мм           | $\tau$ | $L$ , мм           | $\tau$ |
| Врезание | 30,92              | 18,55  | 30,92              | 12,37  |
| ПДДК     | 9,08               | 5,45   | 9,08               | 3,63   |
| Выход    | 30,92              | 18,55  | 30,92              | 12,37  |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

## Радиальный износ шлифовальных кругов

| Длина                                   | $h$ , мкм          |                    |
|-----------------------------------------|--------------------|--------------------|
|                                         | Режим № 1          | Режим № 2          |
|                                         | $v_s = 100$ мм/мин | $v_s = 150$ мм/мин |
| $l = 1$ мм                              | 4,8                | 3,2                |
| $l = 9$ мм                              | 43,0               | 28,7               |
| $l = 14$ мм                             | 66,9               | 44,6               |
| $l = 30$ мм                             | 143,3              | 95,5               |
| $l = 38$ мм                             | 181,5              | 121,0              |
| Этап ПДДК + этап выхода                 | 191,1              | 127,4              |
| Этап врезания + этап ПДДК + этап выхода | 338,8              | 225,8              |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

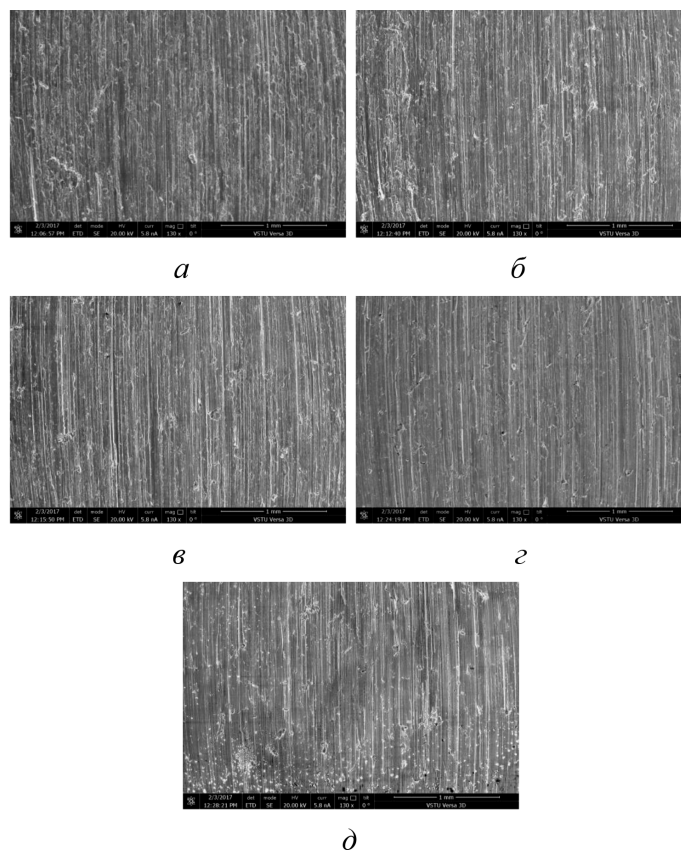


Рис. 2. Морфология обработанной поверхности при  $v_s = 100$  мм/мин:  
 а –  $l = 1$  мм; б –  $l = 9$  мм; в –  $l = 14$  мм; г –  $l = 30$  мм; д –  $l = 38$  мм  
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Протяженность  $L$  и временная продолжительность  $\tau$  этапов ГШ показана в табл. 2.

Найдены значения радиального износа круга  $h$  – на различных участках длины обработанной поверхности и на этапах ГШ. Значения  $h$ , определяемые  $v_s$  и  $S_p$ , приведены в табл. 3.

Получены электронные изображения микрорельефа поверхности сплава Ti6Al4V после шлифования при различных значениях скорости продольной подачи (рис. 2, 3). На рис. 2, а и б, представлены состояния обработанной поверхности в начале и конце этапа ПДДК при обработке на режиме 1.

Состояние поверхности в начале, середине и конце этапа выхода при аналогичных условиях обработки отражено на рис. 2, в–д. Анализ микрорельефа указывает на значительную интенсивность адгезионно-когезионного взаимодействия титанового сплава с абразивным инструментом. Вследствие высокой адгезионной способности титана происходит налипание обрабатываемого материала на вершины зерен шлифовального круга, после чего при последующих оборотах круга часть этого материала переносится на поверхность заготовки в виде наливов. Фрагменты таких наливов наблюдаются на фотографиях поверхности, сформированной на этапе ПДДК (рис. 2, а, б). Если при ГШ режим шлифования и правки обеспечивает стабильный рельеф рабочей поверхности круга, и круг не переходит в режим катастрофического износа, то для этапа ПДДК характерно максимальное значение силы резания [15]. В заданных условиях на этапе ПДДК скорость радиального износа круга приближается к скорости радиальной подачи правящего алмазного ролика или может даже превышать ее, что объясняет формирование наливов металла на обрабатываемой поверхности. Тем не менее состояния поверхности в начале этапа ПДДК и в конце этапа не имеют существенных отличий в заданных условиях.

На этапе выхода  $q$ , а следовательно, и составляющие силы резания, снижаются [13]. Это способствует уменьшению интенсивности когезионного взаимодействия между материалом заготовки и налипшим на вершины зерен круга. Фотография микрорельефа, сформированного в начале этапа выхода, содержит изображение участков поверхности с глубокими царапинами, оставленными острыми вершинами абразивных зерен (рис. 2, в). Можно предположить, что на этапе выхода по мере уменьшения объема металла, удаляемого в единицу времени, нагрузка на вершины зерен снижается, как снижается и скорость радиального износа круга. Соответственно, возрастает количество зерен, проходящих процедуру затачивания правящим алмазным роликом. Следовательно, количество металла, переносимого на заготовку в виде наливов, продолжает уменьшаться (рис. 2, г). К завершению этапа выхода микрорельеф представляет собой череду глубоких царапин и борозд, сформированных вершинами зерен круга, что говорит о высокой эффективности постоянной правки (рис. 2, д). Помимо следов микрорезания, на обработанной поверхности также присутствуют объекты кристаллического строения. По результатам визуальной оценки микрорельефа обработанной поверхности можно

предположить, что их количество увеличивается к завершению этапа выхода. Перенос подобных объектов (кристаллов карбида кремния) был установлен методом точечного элементного анализа в ходе ранее проведенных исследований [10].

С увеличением  $v_s$  в 1,5 раза закономерности формообразования поверхностного слоя Ti6Al4V по длине шлифования, ранее установленные для процесса при режиме 1, сохраняются (рис. 3, а–д). При  $v_s=150$  мм/мин процесс формообразования в начале этапа ПДДК также отличается максимальной интенсивностью переноса наливов металла на обрабатываемую поверхность (рис. 3, а). Эта интенсивность выше, чем при  $v_s = 100$  мм/мин, причем на протяжении всего этапа ПДДК (рис. 3, а, б). С переходом на этап выхода количество наливов на поверхности уменьшается по сравнению с поверхностью на этапе ПДДК (рис. 3, в). Далее, по мере снижения  $q$ , количество переносимого на заготовку металла продолжает уменьшаться (рис. 3, г, д). Тем не менее нельзя сказать, что увеличение  $v_s$  до 150 мм/мин оказывает существенное влияние на состояние морфологии поверхности на этапе выхода в сравнении с  $v_s = 100$  мм/мин, что, вероятно, связано с влиянием принудительной правки – в заданных условиях алмазный ролик одинаково эффективно обновляет периферию шлифовального круга при различных значениях  $v_s$ .

Ранее было установлено, что процесс ГШ титанового сплава кругами из карбида кремния сопровождается переносом на обрабатываемую поверхность абразивного материала [10]. Оценку интенсивности насыщения абразивным материалом оценивали по содержанию кремния после шлифования – ранее в ходе элементного анализа было установлено, что средняя концентрация кремния на поверхности Ti6Al4V увеличивается с ростом окружной скорости шлифовального круга [10].

Наличие абразивного материала на обработанной поверхности в виде объектов кристаллического строения было зафиксировано как в предшествующей [8; 10], так и в текущей серии экспериментов. При ГШ происходит изменение  $q$  по длине шлифования [13], что позволяет выдвинуть гипотезу о различиях в интенсивности переноса абразивного материала (кристаллов карбида кремния) на обрабатываемую поверхность. Стоит предположить, что перенос частиц абразивного материала на титановый сплав сопровождает весь процесс формообразования при ГШ, а интенсивность этого переноса зависит от этапа ГШ и условий обработки.

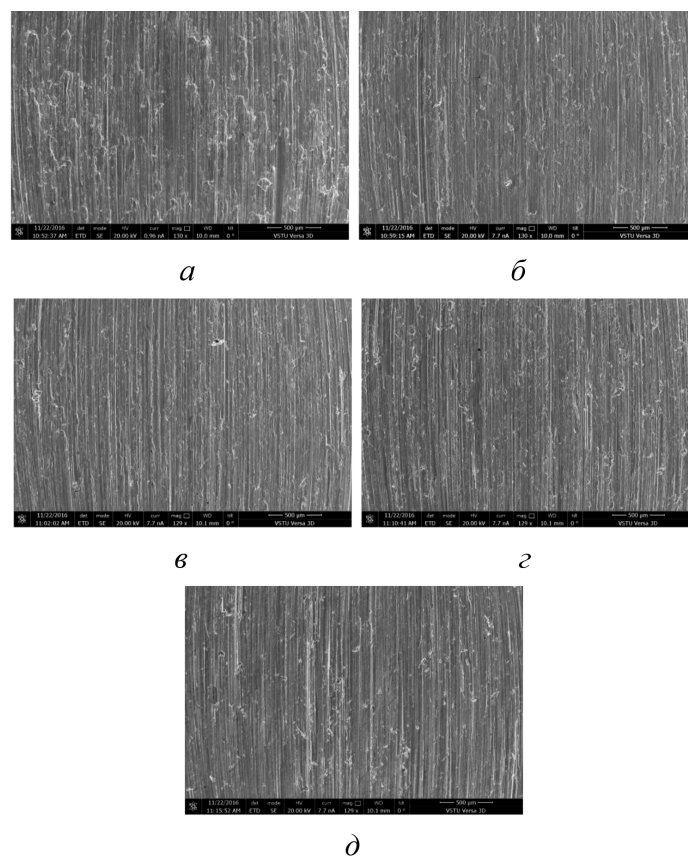


Рис. 3. Морфология обработанной поверхности при  $v_s = 150$  мм/мин:  
 $a - l = 1$  мм;  $б - l = 9$  мм;  $в - l = 14$  мм;  $г - l = 30$  мм;  $д - l = 38$  мм  
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

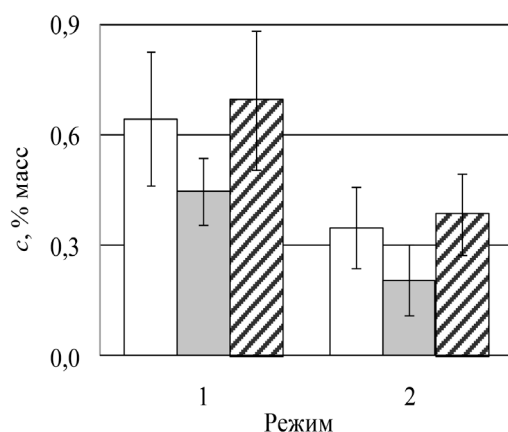


Рис. 4. Среднее значение концентрации Si на обработанной поверхности:  
 $1 - v_s = 100$  мм/мин;  $2 - v_s = 150$  мм/мин  
 □ – вся длина заготовки;  
 ■ – этап ПДК; ▨ – этап выхода  
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для оценки количества переносимого абразивного материала осуществляли элементный анализ – оценивали содержание

кремния на обработанной поверхности методом сканирования по площади (рис. 4). Положения международной спецификации AMS4928 устанавливают требования для химического состава сплава Ti6Al4V – содержание Si в сплаве не должно превышать 0,1 % масс.

Рост содержания кремния на поверхности до уровней 0,6–0,7 % масс. по сравнению с нормативными значениями (< 0,1 % масс.) может свидетельствовать о формировании модифицированного поверхностного слоя, который представляет собой композицию исходного сплава Ti6Al4V и внедренных частиц абразивного материала. Такой слой может иметь отличные от основного металла физико-механические свойства. В частности, карбид кремния обладает высокой твердостью и хрупкостью, а его включения в металл могут приводить к локальному упрочнению поверхности, но одновременно увеличивать склонность к хрупкому разрушению. С точки зрения механических свойств присутствие частиц SiC и повышенное содержание кремния могут оказывать двойственное влияние. С одной стороны, перенос кристаллов карбида кремния мо-

жет обеспечить увеличение микротвердости поверхностного слоя за счет упрочнения включениями и формирование деформационно-упрочненной структуры. С другой стороны, такие включения могут являться концентраторами напряжений, способствующими зарождению микротрещин. В работе, посвященной металлообработке титанового сплава TC4 (наименование сплава Ti6Al4V согласно национального стандарта GB/T KHP), показано, что даже в ходе маятникового шлифования на поверхности заготовки формируются микротрещины, обусловленные высокими температурами в зоне резания и быстрым охлаждением [16]. Объемная режущая способность  $Q$  процесса маятникового шлифования в десятки раз меньше  $Q$  процесса ГШ. Стоит предположить, что при ГШ склонность Ti6Al4V к образованию подобных дефектов поверхностного слоя будет только увеличиваться. Наличие твердых инородных частиц (кристаллов карбида кремния) в Ti6Al4V может дополнительно усиливать образование микротрещин, поскольку существует различие в коэффициентах теплового расширения между титаном и включениями SiC [17]. Нагрев/охлаждение в металле может формировать остаточные и локальные напряжения в окрестности этих включений. Такое напряженное состояние влияет на механические свойства материала в области, где инородные частицы присутствуют, потенциально оказывая негативное воздействие на коррозионную стойкость и долговечность изделия [17].

Одним из факторов, определяющих адгезию в паре абразив – металл, является температура в зоне резания – с ростом температуры сокращается продолжительность времени, необходимая для схватывания контактирующих поверхностей [18, с. 54]. Выбор скорости продольной подачи влияет на показатели ГШ: температуру резания, шероховатость, остаточные напряжения [19]. С увеличением скорости продольной подачи при ГШ происходит снижение температуры в зоне резания. При слишком малых значениях  $v_s$  происходит обратный эффект – перегрев поверхности, связанный с длительным контактом круга с материалом, что подтверждается образованием термических дефектов на поверхности титанового сплава [5]. Таким образом,  $v_s$  определяет время взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом, влияет на количество образующейся при резании теплоты. Следовательно, и в рассматриваемых в настоящей работе условиях увеличение скорости продольной подачи от 100 до 150 мм/мин может оказы-

вать влияние на температуру шлифования и, соответственно, снижать адгезионную активность в паре абразив – металл. Следствием снижения адгезионной активности является уменьшение количества продуктов износа круга, переносимых на поверхность титанового сплава при ГШ (рис. 4). Ключевым фактором снижения концентрации кремния на поверхности Ti6Al4V в заданных условиях является уменьшение временной продолжительности  $\tau$  этапов ГШ (табл. 2) и, следовательно, уменьшение радиального износа круга  $h$  (табл. 3).

Установлено, что среднее значение концентрации кремния на обработанной поверхности, сформированной на этапе выхода, на 50–80 % больше, чем на поверхности, сформированной на этапе ПДДК (рис. 4). За этап ПДДК фактическая глубина шлифования не изменяется. На этапе выхода площадь номинального сечения уменьшается при каждом обороте круга [13], и с уменьшением фактической глубины шлифования возрастает количество зерен круга, проходящих процедуру затачивания правящим алмазным роликом – повышается вероятность их вырывания из связки и, вероятно, схватывания с титановым сплавом. Стоит предположить, что по мере уменьшения фактической глубины шлифования на этапе выхода уменьшается теплоотвод стружкой, но температура в зоне контакта остается высокой, что дополнительно усиливает адгезию и способствует более активному переносу абразивного материала на поверхность титанового сплава при формообразовании на этапе выхода в сравнении с этапом ПДДК.

Увеличение  $v_s$  оказывает значимое влияние как на средние значения концентрации кремния на этапах ГШ, так и на среднее значение по всей длине заготовки (рис. 4). Установлено, что с увеличением скорости продольной подачи от 100 до 150 мм/мин ввиду уменьшения временной продолжительности этапов в рассматриваемых условиях ГШ среднее значение концентрации Si снижается на 44 % (вся длина заготовки), 53 % (этап ПДДК) и 45 % (этап выхода).

### Заключение

С использованием сканирующей электронной микроскопии доказано, что морфология титанового сплава Ti6Al4V изменяется по длине обработанной поверхности при глубинном шлифовании (ГШ) и зависит от закономерностей изменения мгновенной режущей способности  $q$  на этапах ГШ. Установлено, что интенсивность переноса наливов металла на обрабатываемую поверхность титанового сплава Ti6Al4V наиболее высока на этапе постоянной

длины дуги контакта (ПДДК) процесса ГШ в заданных условиях и уменьшается по мере снижения  $q$  на этапе выхода. Увеличение скорости продольной подачи  $v_s$  от 100 до 150 мм/мин оказывает значимое влияние на состояние микрорельефа обработанной поверхности только на этапе ПДДК. Процесс ГШ титанового сплава кругом из карбида кремния сопровождается переносом частиц абразивного материала на обрабатываемую поверхность. Доказано, что интенсивность переноса кристаллов карбида кремния на обрабатываемую поверхность титанового сплава изменяется по длине заготовки и зависит от этапа ГШ. Установлено, что увеличение скорости продольной подачи от 100 до 150 мм/мин обеспечивает снижение концентрации кремния на обработанной поверхности Ti6Al4V на этапах ПДДК и выхода. Таким образом, применение сканирующей электронной микроскопии позволило более комплексно охарактеризовать морфологические изменения и химические показатели поверхности титанового сплава при ГШ и выявить ключевые механизмы формирования дефектов. Результаты исследования могут способствовать определению рекомендаций по оптимизации режимов резания и повышению качества получаемых изделий в будущем.

### Список литературы

1. Коряжкин А. А., Носенко С. В., Носенко В. А. Повышение эффективности обработки рабочих лопаток компрессора из титанового сплава методом многокоординатного глубинного шлифования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 17–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36929652> (дата обращения: 24.03.2026). EDN: YWNDHV.
2. Pereira M. F., Abrao B. S., Abrao A. S., Machado A., Jackson M. J., Hassui A. Influence of grinding wheel conditioning on the grindability of Ti-6Al-4V alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 125. P. 1–12. DOI: 10.1007/s00170-022-10790-3.
3. Mukhopadhyay M., Kundu P. K., Chatterjee S., Das S. Improving grindability of Ti-6Al-4V through applying environmentally benign cutting fluids using SiC wheel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2025. Art. 09544089251343333. DOI: 10.1177/09544089251343333.
4. Heinzl C., Heinzl J., Guba N., Husemann T. Comprehensive analysis of the thermal impact and its depth effect in grinding // CIRP Annals. 2021. Vol. 70. P. 289–292. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.010.
5. Taha-Tijerina J., Edinbarough I. A. Comparative cutting fluid study on optimum grinding parameters of Ti-6Al-4V alloy using flood, minimum quantity lubrication (MQL), and nanofluid MQL (NMQL) // Lubricants. 2023. Vol. 11. Art. 250. DOI: 10.3390/lubricants11060250.
6. Basem A., Naji M., Al-Asadi H., Sediq Safi M. Small-quantity cooling lubrication in creep-feed grinding: surface quality and residual stress analysis // Results in Engineering. 2024. Vol. 22. Art. 102348. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102348.
7. Yin Y., Chen M. Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels // Materials. 2024. Vol. 17. Art. 1784. DOI: 10.3390/ma17081784.
8. Носенко С. В., Носенко В. А., Коряжкин А. А., Кременецкий Л. Л. Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 3. С. 62–72. EDN: LAVNNB. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-3-62-72.
9. Chen T., Wang X., Zhao B., Ding W., Xu J. Surface integrity evolution during creep feed profile grinding of  $\gamma$ -TiAl blade tenon // Chinese Journal of Aeronautics. 2024. Vol. 37. P. 496–512. DOI: 10.1016/j.cja.2024.01.020.
10. Носенко С. В., Носенко В. А., Кременецкий Л. Л. Исследование влияния скорости глубинного шлифования и характеристики абразивного инструмента на качество поверхности титанового сплава // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 1. С. 94–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32856349> (дата обращения: 24.03.2026). EDN: YXCMPO.
11. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // Wear. 2003. Vol. 255. P. 1421–1426. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00163-7.
12. Guo G., Liu Z., An Q., Chen M. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 57. P. 135–142. DOI: 10.1007/s00170-011-3272-z.
13. Носенко В. А., Носенко С. В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 92–98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15055972> (дата обращения: 06.04.2026). EDN: MRMFML.
14. Носенко С. В., Носенко В. А., Зотова С. А. Этапы глубинного шлифования. ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолГТУ, 2021. 166 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46150963> (дата обращения: 06.04.2026). EDN: AROBIW.
15. Носенко С. В., Носенко В. А., Лясин Д. Н., Кременецкий Л. Л. Взаимосвязь составляющих силы резания и мгновенной режущей способности при глубинном шлифовании титанового сплава с постоянной правкой абразивного инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 5. С. 41–51. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-5-41-51. EDN: VVADBX.
16. Zheng X. H., Liu Z. Q., Guo G. Q., An Q. L., Chen M. Experimental research of grinding TC4 titanium alloy using green silicon carbide wheel // Key Engineering Materials. 2011. Vol. 487. P. 121–125. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.487.121.
17. Magnus C., Sharp J., Ma L., Rainforth W. M. Ramification of thermal expansion mismatch and phase transformation in TiC-particulate/SiC-matrix ceramic composite // Ceramics International. 2020. Vol. 46. P. 20488–20495. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.05.151.
18. Худобин Л. В., Унянин А. Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22313741> (дата обращения: 10.04.2026). EDN: SUHOYB.
19. Xu Y., Miao Q., Ding W., Yin Z., Dai C. Creep-feed grinding of different nickel-based superalloys: grinding temperature, and its effect on material removal behavior, tool surface state and surface integrity // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 141. P. 5477–5492. DOI: 10.1007/s00170-025-16962-1.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.