

УДК 621.923.02

РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ МОДЕЛИ РЕЗАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ СЕГМЕНТОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ

© 2024 Я.М. Гордиенко

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Настоящая статья посвящена разработке математической модели для описания силовых характеристик процесса плоского шлифования с использованием прерывистых кругов. Приведена математическая модель для определения численного значения тангенциальной составляющей силы резания с учетом особенностей процесса прерывистого шлифования. С использованием численных методов выполнена оценка сложнонапряженного состояния рабочих сегментов прерывистого шлифовального круга, выполненного на основе абразивных брусков из карбида кремния с включением вулканитовой связки. На основании результатов численного моделирования обоснована техническая возможность применения абразивных брусков из карбида кремния на вулканитовой связке для шлифования титановых сплавов в диапазоне рассматриваемых условий обработки.

Ключевые слова: математическая модель, микрорезание, напряжения, площадка износа, сила резания, сложнонапряженное состояние, численное моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-306-311

EDN: JKUWO

ВВЕДЕНИЕ

Процессы обработки металлов резанием неизбежно сопровождаются возникновением колебаний в смесе СПИД, вследствие действия широкого спектра факторов, начиная от точности изготовления и сборки деталей технологического оборудования инструментов и оснастки, заканчивая принятыми режимами обработки. Особенно ярко указанная проблема проявляется при использовании принципа прерывистого шлифования для отделочной обработки титановых сплавов. С одной стороны, микрорезание титановых сплавов характеризуется высокой удельной энергоемкостью, что, наряду с низкой теплопроводностью титановых сплавов, создает благоприятные условия для развития высоких суб- и критических температур в зоне резания, которые, в свою очередь, приводят к интенсификации износа и засаливания абразивного материала круга. С другой стороны, высокая энергоемкость говорит об относительно высоких значениях сил резания, которые являются одним из ключевых факторов развития вынужденных колебаний в технологической системе.

Как показывают результаты проведенных исследований [1-3], высокая энергоемкость и теплонапряженность зоны резания при шлифовании титановых сплавов являются одной из ключевых причин массового брака готовых

изделий вследствие развития множественных шлифовальных прижогов поверхностного слоя. Одним из наиболее эффективных методов снижения теплонапряженности зоны резания при шлифовании подобных материалов является использование метода прерывистого шлифования, сущность которого лежит в периодической дискретизации контакта рабочей поверхности круга и заготовки, что способствует снижению теплонапряженности в зоне резания, как следствие – уменьшению вероятности возникновения шлифовальных прижогов. В ту же очередь, процесс прерывистого шлифования не лишен недостатков, наиболее значимым из которых является внесение в систему СПИД интенсивных вынужденных колебаний, негативно сказывающихся не только на качестве обработки поверхности, но и на стокости шлифовального инструмента и подшипниковых опор шпинделя технологического оборудования.

Отчасти, решению указанной проблемы может способствовать увеличение числа абразивных сегментов, однако, это закономерно будет приводить к снижению эффективности отвода тепла из зоны резания, являющегося ключевым фактором возникновения проблем при шлифовании титана и сплавов на его основе. Таким образом, практический интерес представляет поиск и обоснование возможности обеспечения приемлемого сочетания тепловых и динамических характеристик процесса прерывистого шлифования. При этом, решение, направленное на «успокоение» колебаний в технологической системе не должно в значительной степени

Гордиенко Ярослав Михайлович, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: gordienko120@yandex.ru

усложнять конструкцию шлифовального инструмента, создавать необходимость внесения конструктивных изменений в технологическое оборудование, а также иметь достаточно высокую технологичность реализации.

Для достижения желаемых эффектов перспективным представляется внедрение в технологическую систему упруго-демпфирующих элементов, за счет изготовления рабочих сегментов круга из абразивных материалов, обладающих выраженными упругими свойствами, таких как, например, вулканит. В отличие от иных связок, используемых при изготовлении абразивных материалов, вулканитовые связки отличаются эластичностью и достаточно высокой прочностью и плотностью, что определяет возможность их применения как на операциях полировки, так и при шлифовании даже труднообрабатываемых материалов. К тому же, широкая распространенность вулканитовых связок и их совместимость с различными абразивами, определяет доступность и достаточно широкое разнообразие форм поставок абразивных материалов на их основе. Вместе с тем, специфика прерывистого шлифования, потенциально может накладывать некоторые ограничения на режимные параметры процесса обработки ввиду малой, относительно «твердых» керамических связок, прочности вулканита. Это все определяет актуальность разработки математической модели для описания силовых характеристик шлифовальной обработки с учетом специфики прерывистого шлифования и исследования возможности обеспечения требуемых режимных параметров обработки с учетом прочностных характеристик абразивного материала.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В целом, механика процесса резания на уровне единичного абразивного зерна при прерывистом шлифовании не отличается сплошного шлифования, в связи с чем, для нахождения численных значений составляющих сил микро-резания, могут быть использованы зависимости, полученные Е. П. Калининым, имеющие следующий вид [4]:

- для тангенциальной составляющей силы резания:

$$P_z = \sigma_v \cdot (28,5 \cdot a_z \cdot d_H + 0,13 \cdot d_H^2) \cdot 1,15 \cdot 10^6 \cdot (31 - C) \cdot N^{-4} \cdot d_H^2 \cdot 1,1 \cdot S_{\text{поп}} \cdot (D_{\text{кр}} \cdot t)^{0,5} = \sigma_v \cdot (31 - C) \cdot N^{-4} \cdot (D_{\text{кр}} \cdot t)^{0,5} \cdot S_{\text{поп}} \cdot (36 \cdot 10^6 \cdot a_z \cdot d_H^3 + 0,16 \cdot 10^6 \cdot d_H^4), \text{ Н}; \quad (1)$$

- для нормальной составляющей силы резания:

$$P_y = \sigma_v \cdot (31 - C) \cdot N^{-4} \cdot (D_{\text{кр}} \cdot t)^{0,5} \cdot S_{\text{поп}} \cdot (43 \cdot 10^6 \cdot a_z \cdot d_H^3 + 1,06 \cdot 10^6 \cdot d_H^4), \text{ Н}; \quad (2)$$

где σ_v – предел выносливости обрабатываемого материала, МПа;

a_z – средняя толщина срезаемого металла, приведенная к единичному абразивному зерну, мм;

d_H – математически ожидаемый диаметр площадок износа вершин единичных абразивных зерен, участвующих в резании, мм;

t – глубина резания, мм;

C – номер структуры абразивного материала по ГОСТ 3647-80;

N – номер зернистости по ГОСТ 3647-80, 10-2 мм;

$S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, мм/дв. ход;

$D_{\text{кр}} = 2 \cdot R$ – диаметр периферии шлифовального круга, мм;

Математически ожидаемый диаметр площадок износа единичных абразивных зерен, участвующих в процессе резания, может быть найден как [4]:

$$d_H = 10^{-2} \cdot (31 - C)^{-0,25} \cdot N \cdot K_3^{0,25}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где K_3 – коэффициент затупления, %.

Максимальный слой, срезаемый единичным абразивным зерном может быть найден как:

$$a_z = \frac{a_{z\text{сегм max}}}{n_{з.п.}}, \text{ мм}, \quad (4)$$

где $a_{z\text{сегм max}}$ – максимальная толщина слоя, срезаемого одним абразивным сегментом, мм;

$n_{з.п.}$ – математически ожидаемое количество абразивных зерен, расположенных вдоль линии профиля периферии абразивного сегмента, ед.

При рассмотрении кинематики процесса прерывистого шлифования, можно установить, что формирование толщины слоя, срезаемого единичным абразивным сегментом шлифовального круга, можно описать по аналогии с кинематикой процесса встречного фрезерования цилиндрической фрезой. Тогда, толщина слоя, срезаемого единичным абразивным сегментом может быть найдена как [5]:

$$a_{z\text{сегм max}} = 2 \cdot S_{\text{сегм}} \cdot \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где $S_{\text{сегм}}$ – подача на сегмент, определяемая как:

$$S_{\text{сегм}} = \frac{V_n}{v \cdot n_{\text{сегм}}}, \text{ мм}, \quad (6)$$

где V_n – скорость продольной подачи, мм/об;

$n_{\text{сегм}}$ – количество рабочих сегментов, шт.;

v – частота вращения круга, об/мин.

Математически ожидаемое количество абразивных зерен, расположенных вдоль линии профиля периферии абразивного сегмента может быть определено из следующего отношения:

$$n_{з.п.} = \frac{F_{\text{сегм}} \cdot n_{з.п.}}{b_{\text{сегм}}}, \text{ ед.}, \quad (7)$$

где $F_{\text{сегм}}$ – площадь периферии абразивного сегмента круга, мм²;

$n_{з.п.}$ – математически ожидаемое удельное количество абразивных зерен, приведенное к площади периферии абразивного сегмента, 1/мм².

$b_{\text{сегм}}$ – ширина сегмента, мм.

Площадь периферии абразивного круга без учета износа может быть найдена как:

$$F_{\text{сегм}} = b_{\text{сегм}} \cdot l_1, \text{ мм}^2. \quad (8)$$

где l_1 – длина профиля рабочей поверхности сегмента, мм.

Отсюда:

$$n_{\text{з.п.}} = l_1 \cdot n_{\text{з.р.п.}}, \text{ ед.}, \quad (9)$$

Математически ожидаемое удельное количество абразивных зерен, приведенное к площади периферии абразивного сегмента, определяется следующей зависимостью [4]:

$$n_{\text{з.р.п.}} = 1,15 \cdot 10^2 \cdot (31 - c)^{0,5} \cdot N^{-2} \cdot K_3^{0,5}, \text{ 1/мм}^2. \quad (10)$$

Как показывают исследования, проведенные Д. В. Старышевым [6] и А. В. Смирновым [7], для прерывистого шлифования характерным является изменение значения тангенциальной составляющей сил резания в соответствии с закономерностью, график которой представлен на рисунке 1.

Подобная динамика изменения значений тангенциальной сил резания связана с преодолением противодействующих сил упругой деформации, предшествующей пластической, лежащей в основе механики процесса абразивного резания титановых сплавов.

Для определения пикового значения тангенциальной силы резания, возникающей в момент внедрения абразивного сегмента в материал заготовки Д. В. Старышевым [6] предложено использование коэффициента динамичности, выражение для определения численного значения которого имеет вид:

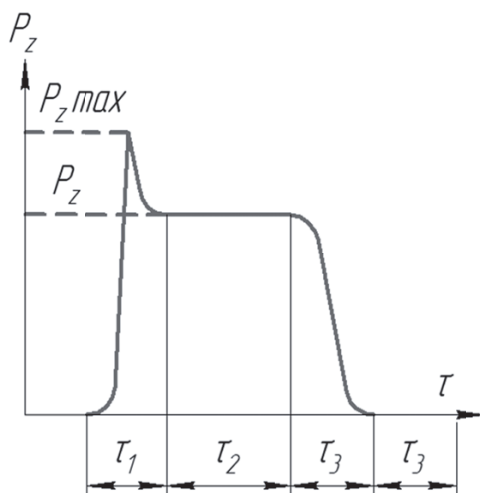


Рис. 1. Характерный график функции $P_z(\tau)$, где: τ_1 – время врезания абразивного сегмента, τ_2 – работа абразивного сегмента, τ_3 – время выхода абразивного сегмента из контакта с заготовкой, τ_4 – время прохождения впадины; $P_{z\text{max}}$ – пиковое значение тангенциальной составляющей силы резания, P_z – тангенциальная составляющая силы резания

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{V_{\text{кр}}^2}{g \cdot \delta_{\text{ст}}}}, \quad (11)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$V_{\text{кр}}$ – окружная скорость круга, м/с;

$\delta_{\text{ст}}$ – показатель абсолютной деформации стружки при статическом приложении силы преодоления упругой деформации металла, определяемый как:

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{Zcy}} \cdot l_{\text{сп}}}{E \cdot a_z \cdot d_{\text{н}}}, \text{ мм}, \quad (12)$$

где E – модуль упругости обрабатываемого материала, кг/мм²;

$l_{\text{сп}}$ – длина дуги профиля среза, формируемого единичным рабочим сегментом, мм;

P_{Zcy} – сила преодоления упругой деформации металла, определяется как:

$$P_{\text{Zcy}} = \frac{2 \cdot \tau \cdot a_z \cdot d_{\text{н}}}{\sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}, \text{ кг}, \quad (13)$$

где $\theta = 10,0 \div 20,0^\circ$ – угол сдвига стружки при микрорезании;

τ – предел прочности обрабатываемого материала на срез, определяемый как:

$$\tau = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}}, \text{ кг/мм}^2, \quad (14)$$

где σ_B – предел выносливости обрабатываемого материала, кг/мм².

В таком случае, пиковое значение тангенциальной силы резания в момент внедрения в материал заготовки может быть найдено как:

$$P_{z\text{max}} = k_d \cdot P_z, \text{ Н}. \quad (15)$$

В таком случае, приводя к общей размерности величину предела выносливости σ_B и решая совместно приведенные выше уравнения, получим математическую модель для нахождения пикового значения тангенциальной составляющей силы резания, имеющую следующий вид:

$$P_{z\text{max}} = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{V_{\text{кр}}^2}{\frac{2 \cdot \sigma_B \cdot l_{\text{сп}}}{\sqrt{3}} \cdot E \cdot \sin\left(\frac{\theta \cdot \pi}{180}\right)}}} \right) \cdot \sigma_B \cdot (31 - c) \cdot N^{-4} (D_{\text{кр}} \cdot t)^{0,5} \cdot S_{\text{поп}} \cdot (36 \cdot 10^6 \cdot a_z \cdot d_{\text{н}}^3 + 0,16 \cdot 10^6 \cdot d_{\text{н}}^4), \text{ Н}. \quad (16)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью проверки технической возможности реализации метода прерывистого шлифования с использованием рабочих сегментов на основе абразивных брусков из карбида кремния на вулканитовой связке, был проведен численный эксперимент, направленный на оценку максимальных растягивающих напряжений, воз-

никающих в теле рабочего сегмента в условиях сложнагруженного состояния, обусловленного воздействием тангенциальной, радиальной составляющих сил резания, а также центробежной силы. В качестве обрабатываемого материала рассматривался титановый сплав марки ВТ9 с $\sigma_B = 1150,0$ МПа. Определение действующих на модельный сегмент сил резания и центробежной силы производилось для следующих режимных параметров обработки:

- окружная скорость резания $V_{\text{кр}} = 80,0$ м/с;
- продольная подача $V_{\text{п}} = 0,075$ м/с;
- коэффициент затупления $K_z = 5,0$ %;
- поперечная подача $S_{\text{поп}} = 5,0$ мм/дв. ход.

Перевод указанных параметров в необходимые размерности осуществлялся в соответствии с известными зависимостями, представленными в [5].

В качестве модельного рабочего сегмента рассматривался сегмент, выполненный из призматических абразивных брусков размерами $b_{\text{сегм}} \times h_{\text{сегм}} \times l_{\text{сегм}} = 30,0 \times 20,0 \times 20,0$ мм. Необходимые физико-механические характеристики абразивного материала принимались в соответствии с данными, представленными в [9].

Определение напряженного состояния брусков в условиях сложного нагружения произво-

дилось с использованием метода конечных элементов на базе программного продукта Ansys Workbench. Расчет составляющих сил резания, а также центробежной силы, действующих на модельный брусок производился с использованием математического инструментария программного продукта Microsoft Excel. В качестве граничных условий принималось трехстороннее закрепление брусков с жесткой заделкой (Fixed Support) в прорези корпуса инструмента глубиной 5,0 мм. Результаты построения электронной модели рабочего сегмента, а также приложения граничных условий и определения эквивалентных напряжений в условиях сложнагруженного состояния бруска представлены на рисунках 2-4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По итогам выполненного численного моделирования сложнагруженного состояния модельного рабочего сегмента прерывистого круга, выполненного из абразивных брусков на вулканитовой связке, было установлено, что максимальные эквивалентные растягивающие напряжения в опасном сечении сегмента (на границе крепления), составляют $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 20,754$ МПа.

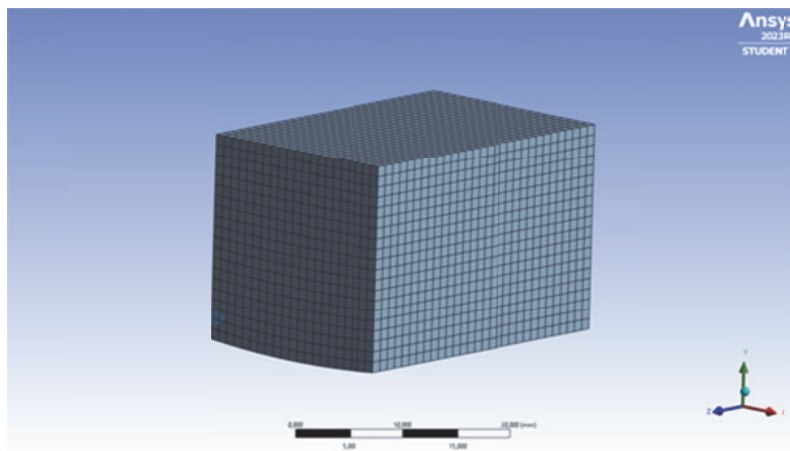


Рис. 2. Результат построения конечно-элементной модели абразивного сегмента в программной среде Ansys Workbench

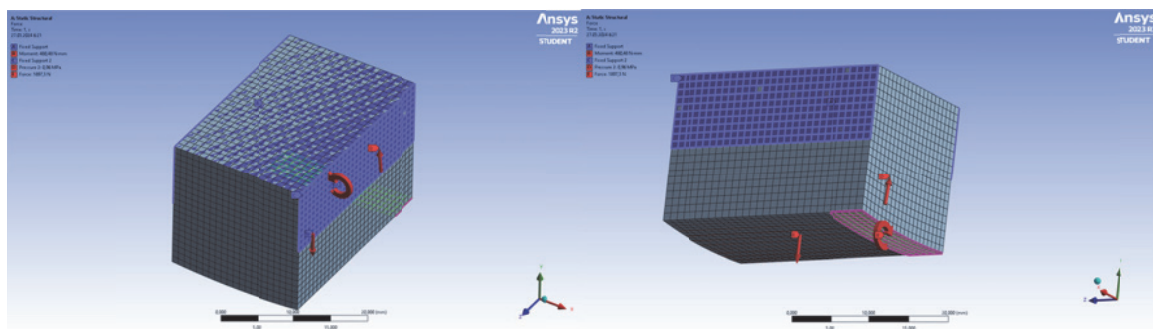


Рис. 3. Приложение нагрузок и закреплений к конечно-элементной модели абразивного сегмента

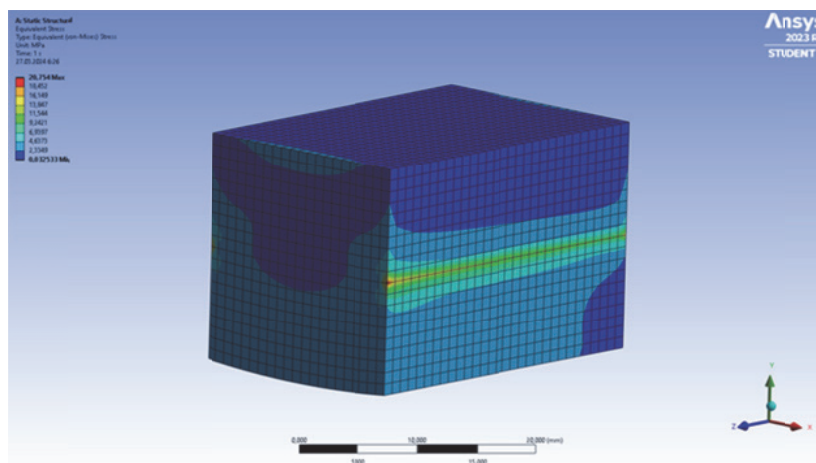


Рис. 4. Эпюра эквивалентных растягивающих напряжений

В таком случае, при пределе прочности абразивного материала из карбида кремния на вулканитовой связке равным $\sigma_p(\text{вулканинит}) = 46,0$ МПа [9], прочность материала рабочего сегмента на разрыв в условиях сложнагруженного состояния обеспечивается с запасом прочности, составляющим:

$$k_{\text{запаса}} = \frac{\sigma_p(\text{вулканинит})}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = \frac{46,0}{20,754} = 2,21. \quad (17)$$

ВЫВОДЫ

По итогам проведенной исследовательской работы, была разработана математическая модель для определения численного значения тангенциальной составляющей силы резания с учетом особенностей процесса прерывистого плоского шлифования периферией круга. Методом численного моделирования выполнено определение эквивалентных напряжений, действующих на модельный рабочий сегмент, выполненный из абразивного бруска на вулканитовой связке. Показано, что для рассматриваемых условий обработки, использование абразивных брусков на вулканитовой связке для изготовления рабочих сегментов прерывистого круга удовлетворяет условию обеспечения приемлемого запаса прочности при сложнагруженном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачёв, И. С. Полькин. – М. : ВИС-МАТИ, 2009. – 520 с. – Текст : непосредственный.
2. Магницкий, О. Н. Литейные свойства титановых сплавов / О. Н. Магницкий. – Л. : Машиностроение, 1968. – 120 с. – Текст : непосредственный.
3. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с. – Текст : непосредственный.
4. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дисс ... докт. техн. наук / Е. П. Калинин. – ОАО «ЗТЛ». – Рыбинск, 2006. – 414 с. – Текст : непосредственный.
5. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков, В. М. Кован, А. Г. Косилова. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с. – Текст : непосредственный.
6. Старышев, Д. В. Совершенствование процесса шлифования титановых сплавов прерывистыми кругами на базе математического моделирования механики и теплофизики процесса : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дисс канд. техн. наук / В. А. Смирнов ; ФГБОУ ВО ИжГТУ. – Ижевск, 2006. – 153 с. – Текст : непосредственный.
7. Смирнов, В. А. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга за счет использования прерывистых кругов с упругодемпфирующими элементами : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» : дисс... канд. техн. наук / В. А. Смирнов. – ФГБОУ ВО ИжГТУ. – Ижевск, 2008. – 140 с. – Текст : непосредственный.
8. Спиринов, В. А. Моделирование контактных явлений при абразивном глобоидном зубохонинговании : учеб. пособие / В. А. Спиринов, В. Ф. Макаров. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 147 с. – Текст : непосредственный.

DEVELOPMENT OF A POWER MODEL FOR CUTTING THE INTERMITTENT GRINDING PROCESS AND INVESTIGATION OF THE COMPLEX STRESS STATE OF THE WORKING SEGMENTS ON A VULCANITE BUNDLE

© 2024 Y.M. Gordienko

Samara State Technical University, Samara, Russia

The present article is devoted to the development of a mathematical model for describing the power characteristics of the flat schliophany process using discontinuous circles. A mathematical model is developed to determine the numerical value of the tangential component of the cutting force, taking into account the features of the intermittent grinding process. Using numerical methods, the assessment of the complexly loaded condition of the working segments of an intermittent grinding wheel made on the basis of abrasive bars made of silicon carbide on a vulcanite bundle was performed. Based on the results of numerical modeling, the technical feasibility of using abrasive bars made of silicon carbide on a vulcanite bond for the manufacture of a grinding wheel for grinding titanium alloys for the processing conditions under consideration is substantiated.

Keywords: mathematical model, micro-cutting, stresses, wear site, cutting force, complex stress state, numerical modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-306-311

EDN: JKKUWO

REFERENCES

1. *Ilyin, A. A.* Titanium alloys. Composition, structure, properties : handbook / A. A. Ilyin, B. A. Kolachev, I. S. Polkin. – M. : VILS-MATI, 2009. – 520 p. – Text : direct.
2. *Magnitsky, O. N.* Foundry properties of titanium alloys / O. N. Magnitsky. – L. : Mashinostroenie, 1968. – 120 p. – Text : direct.
3. *Illarionov, A. G.* Technological and operational properties of titanium alloys : a textbook / A. G. Illarionov, A. A. Popov. Yekaterinburg : Ural Publishing House. unita, 2014. – 137 p. – Text : direct.
4. *Kalinin, E. P.* Theory and practice of performance management of abrasive processing, taking into account tool bluntness : specialty 05.03.01 «Technologies and equipment of mechanical and physico-technical processing»: diss... Doct. Techn. Sciences / E. P. Kalinin. – JSC «ZTL». – Rybinsk, 2006. – 414 p. – Text : direct.
5. *Korsakov, V. S.* Fundamentals of mechanical engineering technology / V. S. Korsakov, V. M. Kovan, A. G. Kosilova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 416 p. – Text : direct.
6. *Staryshev, D. V.* Improvement of the grinding process of titanium alloys with intermittent circles based on mathematical modeling of mechanics and thermophysics of the process : specialty 05.03.01 «Technologies and equipment of mechanical and physico-technical processing» : diss... Cand. Techn. Sciences / V. A. Smirnov. – FGBOU IN IzhSTU. Izhevsk, 2006. – 153 p. – Text : direct.
7. *Smirnov, V. A.* Improving the efficiency of flat grinding by the periphery of the circle through the use of intermittent circles with elastic damping elements : specialty 05.03.01 «Technologies and equipment of mechanical and physico-technical processing» : diss... Cand. of Technical Sciences / V. A. Smirnov. – FGBOU IN IzhSTU. Izhevsk, 2008. 140 p. – Text : direct.
8. *Spirin, V. A.* Modeling of contact phenomena in abrasive globoid tooth honing : textbook. handbook / V. A. Spirin, V. F. Makarov. – Perm : Publishing house of Perm. national research. Polytechnic University. Unita, 2013. – 147 p. – Text : direct.