

УДК 621.454.3:628

Л.Д. Сиротенко, А.А. Дроздов, П.В. Нужин

L.D. Sirotenko, A.A. Drozdov, P.V. Nuzhin

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРУЕМУЮ
ПОВЕРХНОСТЬ РЕЗИНОВОГО ПОКРЫТИЯ
ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ**

**DETERMINATION OF POWER INTERACTION
PARAMETERS ON FORMED RUBBER COATING
SURFACE AT INTERNAL GRINDING**

Приведены результаты аналитических расчетов силовых параметров при внутренней абразивной обработке резиновых теплозащитных покрытий. Представлен критерий разрушения резинового материала в процессе абразивной обработки. Установлена аналитическая зависимость между контактным напряжением в зоне обработки и силами, приходящимися на единичное зерно.

Ключевые слова: абразивная обработка, усилие прижима, резиновое покрытие, зерно, контактные напряжения.

The results of analytical calculations of power parameters for internal abrasive treatment of rubber thermal-protective coatings are shown. The criteria of rubber material fracture during abrading is presents. Analytical dependences between the contact stress in the treatment zone and the forces attributable to a single grain are determined.

Keywords: abrasive treatment, clamping force, rubber coating, grain, contact stress.

Основными параметрами, определяющими интенсивность процесса абразивной обработки резинового покрытия, являются прочностные свойства обрабатываемого материала, а также уровень силового воздействия на формируемую поверхность покрытия. В свою очередь, наиболее значимыми факторами, влияющими на величину приложенных сил в зоне обработки, являются режимы шлифования.

В работе рассматривается процесс внутреннего шлифования резинового покрытия длинномерного цилиндрического изделия с переменным радиусом вдоль его оси. Исходная толщина покрытия также изменяется по оси изделия, при этом интервал ее изменения составляет 2,5–10,5 мм.

Параметрами режима обработки являются число оборотов шлифовального круга (n , об/с), продольная подача абразивного инструмента по оси изделия (S , м/об), число оборотов обрабатываемого изделия с внутренним покрытием (n_1 , об/с). В связи с переменными значениями радиуса изделия и толщины резинового покрытия вдоль оси изделия обработка покрытия производилась с использованием постоянного усилия прижима абразивного круга к обрабатываемому материалу. Интервал возможных значений усилия прижима для используемого оборудования составил 50–150 Н.

Целью работы является представление результатов определения усилия прижима абразивного круга к заготовке, при котором начинается процесс шлифования резинового материала покрытия.

Для определения усилия прижима рассмотрим схему работы единичного зерна абразивного круга. Анализ работ, посвященных моделированию формы зерна абразивного круга, свидетельствует о том, что зерна, расположенные на поверхности круга, имеют сложные геометрические формы многогранников, математически точно описать которые не представляется возможным [1]. В связи с этим в качестве их моделей принимаются элементарные геометрические фигуры, позволяющие получить численные результаты при решении различных технологических задач.

В данной работе геометрия рабочей части зерна представлена прямой призмой, две грани которой (основания призмы) представляют собой равные трапеции с взаимно параллельными сторонами, а остальные грани имеют прямоугольную форму, при этом размеры площади контакта зерна с обрабатываемым материалом составляют $l \cdot l$, при этом $l = cx$ [2], где x – средний размер зерна, c – коэффициент затупления зерен, $c = 0,15–0,35$. Расчетная схема для определения сил, приходящихся на одно зерно, представлена на рис. 1.

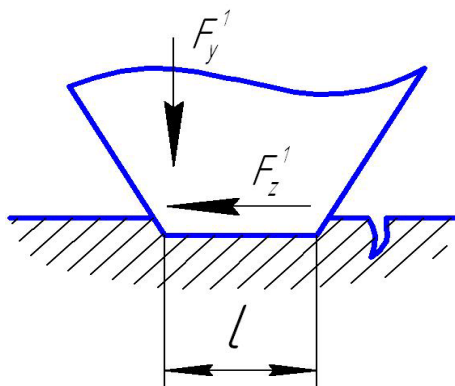


Рис. 1. Схематизация формообразующего выступа шлифовального зерна

Высота формообразующего выступа зерна соответствует вылету зерна из связки и определяется выражением εx , где ε – относительная критическая глубина заделки зерен, $\varepsilon = 0,7-0,8$. Средний размер зерна при абразивной обработке покрытия кругом 1-180×20×32 25 AF35OBF 30 м/с составил 0,5 мм.

Для определения усилия прижима абразивного круга, приходящегося на 1 зерно, использовалось известное решение задачи теории упругости [3], описывающей действие на полубесконечную пластину силы P , приложенной вдоль ее прямолинейной кромки (рис. 2).

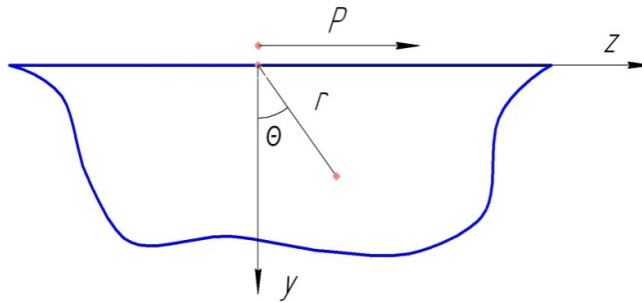


Рис. 2. Расчетная схема задачи для определения напряжений в обрабатываемом материале

Решение задачи, расчетная схема которой представлена на рис. 2, определяется формулами

$$\sigma_{rr} = \frac{2P \sin \theta}{\pi r}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{r\theta} = 0,$$

где r , θ – координаты точки, в которой необходимо определить напряжение; P – сила вдоль кромки обрабатываемого материала, приходящаяся на единицу ширины пластины.

В настоящее время имеется ряд работ, свидетельствующих о том, что разрушение резиновых материалов, в отличие от металлов, происходит в результате образования трещин позади индентора, в роли которого выступает абразивное зерно [4]. При этом образовавшиеся трещины распространяются вертикально по отношению к поверхности обрабатываемого резинового материала, в результате чего образуются так называемые ячейки раздира.

Выражение для расчета напряжений σ_{rr} позади задней кромки зерна определяется на основе формулы (1) при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $r = \frac{l}{2}$:

$$\sigma_{rr} = \frac{4P}{\pi l}. \quad (2)$$

С учетом того, что в момент разрушения $\sigma_{rr} = \sigma_p$, где σ_p – предел прочности резины на растяжение, а сила P , приходящаяся на единицу ширины зерна, связана с горизонтальной силой F_z^1 , действующей на зерно в целом, выражением $F_z^1 = Pl$, получим выражение для силы F_z^1 :

$$F_z^1 = \frac{\pi}{4} \sigma_p l^2. \quad (3)$$

На основании формулы (3) можно определить значение вертикальной силы F_y^1 , приходящейся на одно зерно:

$$F_y^1 = \frac{\pi}{4\mu} \sigma_p l^2, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения пары «электрокорунд – резина» ($\mu = 0,5$).

Для расчета значения сил F_z и F_y , которые следует приложить к абразивному кругу для осуществления процесса шлифования, необходимо определить число активных зерен на единицу площади контакта [5]:

$$n_p = \frac{0,4}{x^2} \sqrt{\frac{wK}{v(1-\varepsilon)}}, \quad (5)$$

где x – средняя величина зерна, мм; K – концентрация режущего материала в круге, %; v – скорость шлифования, м/с; ε – относительная глубина заделки зерен; w – скорость погружения зерен в обрабатываемый материал, м/с.

Величина скорости погружения зерен в обрабатываемый материал определяется выражением

$$w = v_1 \sqrt{\frac{t}{D_k}}, \quad (6)$$

где v_1 – окружная скорость изделия; t – припуск, снимаемый за один проход (один оборот изделия); D_k – диаметр абразивного круга.

Припуск, снимаемый за один проход, определяется на основе анализа продольного движения инструмента относительно обрабатываемого изделия:

$$t = \frac{\Pi S}{B}, \quad (7)$$

где Π – общий припуск на обработку покрытия; S – продольная подача абразивного инструмента; B – ширина абразивного круга.

Для получения численных результатов использовались данные технического задания на обработку изделия на участке с минимальным диаметром $D_{\text{н}} = 0,22$ м, где величина общего припуска составила $\Pi = 0,7-1,0$ мм. На основании известного решения задачи Герца о контакте двух цилиндров с параллель-

ными осями, один из которых имеет выпуклую, а другой – вогнутую поверхность, следует, что при постоянном усилии прижима абразивного инструмента при движении вдоль оси всего изделия контактные напряжения при увеличении диаметра участка изделия будут возрастать. В связи с этим достаточно определить условия силового воздействия со стороны абразивного инструмента на участке изделия с минимальным диаметром, при этом данные силовые параметры обеспечат абразивную обработку и на участках с большими диаметрами.

Значения припуска за один оборот изделия при $S = 3$ мм/об, $B = 20$ мм по формуле (7) составили $t = 0,105–0,150$ мм. Значения скорости погружения абразивного инструмента в обрабатываемый материал при $D_{и} = 0,22$, $n_1 = 0,2$ об/с, $D_{к} = 0,18$ м, $v_1 = 0,138$ м/с по формуле (6) составили $w = 3,33–3,39$ мм/с.

Полученные значения скорости погружения в обрабатываемый материал позволили рассчитать число активных зерен n_p , приходящихся на единицу контактной площади инструмента с обрабатываемой поверхностью при $K = 200$, $x = 0,5$ мм, $v = 4,52$ м/с, $\varepsilon = 0,75$. При этом значения числа зерен на единицу поверхности для $\Pi = 0,7–1,0$ мм составили соответственно $n_p = (1,22–1,34) \cdot 10^6$ зерен/м².

Максимальное контактное напряжение между кругом и обрабатываемым изделием в зоне абразивной обработки может быть определено по формуле

$$\sigma_h = F_y^1 n_p. \quad (8)$$

В свою очередь, контактное напряжение σ_h в соответствии с решением задачи Герца о контакте двух цилиндров связано с вертикальной силой F_y , действующей на абразивный круг в процессе обработки, следующим соотношением:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{E^* F_y}{\pi B R}}, \quad (9)$$

где E^* – приведенный модуль упругости; B – ширина круга; R – приведенный радиус кривизны [6].

Для определения приведенного модуля упругости материала круга как сложной структурной системы, состоящей из корундовых режущих элементов, элементов бакелитовой связки и пор, в качестве оценочного значения использовалось выражение

$$E_1 = E_{ek} V_{ek} + E_{bak} V_{bak} + E_{por} V_{por}, \quad (10)$$

где E_{ek} – модуль упругости электрокорунда, $E_{ek} = 7,6 \cdot 10^{11}$ Па; E_{bak} – модуль упругости бакелитового связующего, $E_{bak} = 2,5 \cdot 10^9$ Па; E_{por} – модуль упругости пор, $E_{por} = 0$; V_{ek} , V_{bak} , V_{por} – их объемные содержания соответственно.

Выражения для вертикальной и горизонтальной составляющих силы, необходимой для абразивной обработки резинового покрытия, определяются на основе формул (3), (4), (8), (9):

$$F_y = \frac{\pi^3 B R l^4 \sigma_p^2 n_p^2}{16 E \mu^2}, \quad (11)$$
$$F_z = \mu F_y.$$

Расчетное значение силы прижима абразивного круга, необходимой для абразивной обработки резинового покрытия, при $\sigma_p = 7,2$ МПа, $\Pi = 0,7-1,0$ мм составило $F_y = 93,7-112,94$ Н, что подтверждается результатами экспериментальных испытаний.

Список литературы

1. Никифоров И.П. К вопросу о геометрии абразивного зерна // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 9. – С. 65–68.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высшая школа, 1979. – 432 с.
4. Клищенко В.П., Абдрахимов Ю.Р., Вадулина Н.В. Разрушение резин при различных способах механического воздействия // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 2. – С. 419–429.
5. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 238 с.
6. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. – М.: Физматлит, 2012. – 348 с.

Получено 07.12.2015

Сиротенко Людмила Дмитриевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: sirotenko@pstu.ru.

Дроздов Андрей Александрович – аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: ittamp@mail.ru.

Нужин Павел Владимирович – магистр кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: pavel.nuzhin@mail.ru.