

УДК 621.923

В.А. Федорович, д-р техн. наук, Е.В. Островерх, канд. техн. наук,
Н.В. Козакова, канд. техн. наук, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ АЛМАЗНЫМИ РОЛИКАМИ

3D дослідження процесу правки алмазних шліфувальних кругів, що дозволяє отримати якісне і кількісне уявлення про його фізико-механічні особливості, дозволяє оптимізувати процес правки і збільшити працездатність правлячого інструмента

Ключові слова: правлячий ролик, алмазне зерно, зв'язка, металофаза, еквівалентні напруги

3D исследование процесса правки алмазных шлифовальных кругов, позволяющее получить качественное и количественное представление о его физико-механических особенностях, дает возможность оптимизировать процесс правки и увеличить работоспособность правящего инструмента

Ключевые слова: правящий ролик, алмазное зерно, связка, металлофаза, эквивалентные напряжения

3D study of the process of dressing diamond grinding wheels, which allows to obtain a qualitative and quantitative representation of its physico-mechanical features, makes it possible to optimize the dressing process and increase the efficiency of the dressing tool

Keywords: dressing roller, diamond grain, binder, metal phase, equivalent stresses

Применяемая для восстановления режущей способности и создания правильной геометрической формы шлифовального круга правка, удаляя верхний «засаленный» слой, создает новые острые грани на его зернах. Преимуществами алмазной правки являются малые усилия и большая износостойкость алмаза, что обеспечивает точность геометрической формы круга и малую шероховатость обрабатываемой им поверхности [1]. Прогрессивным инструментом для правки шлифовальных кругов являются многокристальные вращающиеся алмазные ролики, осуществляющие правку способом шлифования [2].

3D исследование процесса правки алмазных шлифовальных кругов, позволяющее получить качественное и количественное представление о его физико-механических особенностях, позволит оптимизировать процесс правки и увеличить работоспособность правящего инструмента.

С использованием пакета программ *CosmosWorks* была построена исходная геометрическая 3D модель системы «правящий ролик–алмазный круг» (рис. 1). Предполагалось, что элементы этой системы являются сплошными упругими телами.

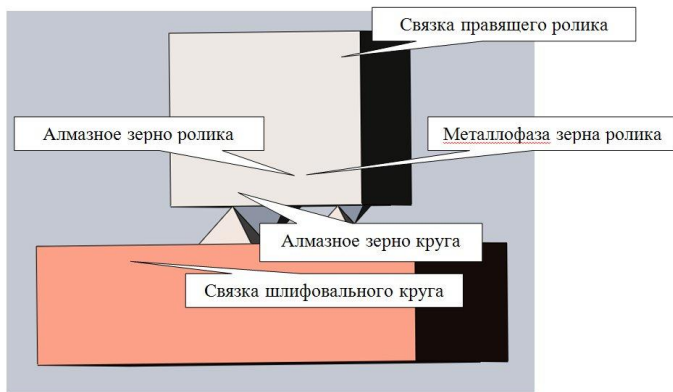


Рисунок 1 – Исходная геометрическая 3D модель

На втором этапе производилось создание сетки конечных элементов и ее сгущение в области контакта зерна ролика с зерном алмазного круга. Затем были определены физико-механические свойства всех элементов системы.

Следующим этапом моделирования было задание параметров нагружения модели (рис. 2). В ходе расчетного эксперимента модель нагружалась нормальными силами P_y , равными $3H$ и тангенциальными силами P_z равными $5H$, что моделировало движение алмазного шлифовального круга во время правки с ограничением его степеней свободы.

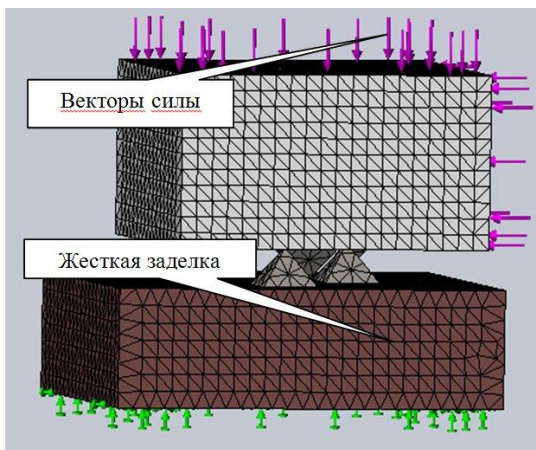


Рисунок 2 – Сетка конечных элементов и нагружение модели

Для определения оптимальных условий процесса правки алмазного круга был использован метод планирования модельного эксперимента [3], в расчетах использовался план типа В4 [4].

При планировании модельного эксперимента в качестве факторов были приняты: модуль упругости связки правящего ролика (E_p), температура правки (T), модуль упругости связки шлифовального круга ($E_{кр}$) и коэффициент термического расширения (КТР) металлофазы алмазного зерна правящего ролика (α_p). Выбор интервала варьирования не является формализованной процедурой, а зависит от интуиции исследователя, поэтому были приняты значения уровней факторов, указанные в табл. 1.

Таблица 1 – Уровни факторов

Уровни факторов	Фактор – модуль упругости связки правящего ролика E_p		Фактор КТР металлофазы алмазного зерна правящего ролика α_p		Фактор – модуль упругости связки шлифовального круга $E_{кр}$		Фактор – температура правки T	
	Натуральное значение, H/M^2	Кодированное значение X_1	Натуральное значение, $1/\text{K}$	Кодированное значение X_2	Натуральное значение, H/M^2	Кодированное значение X_3	Натуральное значение, $^{\circ}\text{C}$	Кодированное значение X_4
Верхний	$1,9 \cdot 10^{11}$	+1	$2,4 \cdot 10^{-5}$	+1	$1,40 \cdot 10^{11}$	+1	600	+1
Основной	$1,3 \cdot 10^{11}$	0	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0	$1,25 \cdot 10^{11}$	0	510	0
Нижний	$0,7 \cdot 10^{11}$	-1	$1,2 \cdot 10^{-5}$	-1	$1,10 \cdot 10^{11}$	-1	420	-1

Результаты проведенных 24-х расчетов для этих факторов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета по матрице планирования модельного эксперимента для процесса правки алмазного круга

№ эксперимента	Значения факторов				
	X_1 – модуль упругости связи правящего ролика E_p , Н/м ²	X_2 – температура правки T , °С	X_3 – модуль упругости связи шлифовального круга $E_{кр}$, Н/м ²	X_4 – КТР металлофазы алмазного зерна правящего ролика α_p , 1/К	Y – максимальные напряжение в зоне правки σ , ГПа
1	$1,9 \cdot 10^{11}$	620	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,67
2	$0,7 \cdot 10^{11}$	620	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	2,30
3	$1,9 \cdot 10^{11}$	480	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,33
4	$0,7 \cdot 10^{11}$	480	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	2,12
5	$1,9 \cdot 10^{11}$	620	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,63
6	$0,7 \cdot 10^{11}$	620	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	2,28
7	$1,9 \cdot 10^{11}$	480	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,27
8	$0,7 \cdot 10^{11}$	480	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	1,84
9	$1,9 \cdot 10^{11}$	620	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,61
10	$0,7 \cdot 10^{11}$	620	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	2,35
11	$1,9 \cdot 10^{11}$	480	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,29
12	$0,7 \cdot 10^{11}$	480	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	2,18
13	$1,9 \cdot 10^{11}$	620	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,59
14	$0,7 \cdot 10^{11}$	620	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	1,75
15	$1,9 \cdot 10^{11}$	480	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,26
16	$0,7 \cdot 10^{11}$	480	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	1,73
17	$1,9 \cdot 10^{11}$	550	$1,25 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	2,31
18	$0,7 \cdot 10^{11}$	550	$1,25 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	1,84
19	$1,3 \cdot 10^{11}$	620	$1,25 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	3,42
20	$1,3 \cdot 10^{11}$	480	$1,25 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	3,27
21	$1,3 \cdot 10^{11}$	550	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	3,55
22	$1,3 \cdot 10^{11}$	550	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	3,45
23	$1,3 \cdot 10^{11}$	550	$1,25 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,52
24	$1,3 \cdot 10^{11}$	550	$1,25 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	3,49

В результате обработки матрицы планирования эксперимента получено уравнение регрессии:

$$Y = 3,063 - 0,138X_1 + 0,433X_2 + 0,393X_3 - 0,585X_4 - 0,131X_1^2 - 0,976X_1^3 - 0,446X_1^4 + 0,783X_2^3 + 0,363X_2^4 + 0,166X_3^4 - 0,762X_1^2 + 0,393X_2^2 + 0,248X_3^2 - 0,712X_4^2 \quad (1)$$

Оптимизация полученного уравнения регрессии позволила получить

значения факторов, при которых напряжения в алмазных зернах будут максимальными, что обеспечит эффективный процесс правки алмазного круга. Эти значения факторов использованы при дальнейшем анализе.

Визуализация результатов 24-х расчетов по влиянию выбранных факторов на напряженно-деформированное состояние зоны правки алмазного круга представлена на рис. 3.

Проведенные расчеты 3D напряженно-деформированного состояния системы «связка ролика–алмазное зерно ролика–металлофаза зерна ролика–алмазное зерно круга–связка круга» в специализированном пакете программ *CosmosWorks*, позволило установить влияние характеристик правящего ролика и шлифовального круга на величину напряжений в зоне правки при различных силовых и температурных нагрузках, а также рассчитать эквивалентные напряжения в исследуемой системе при их варьировании.

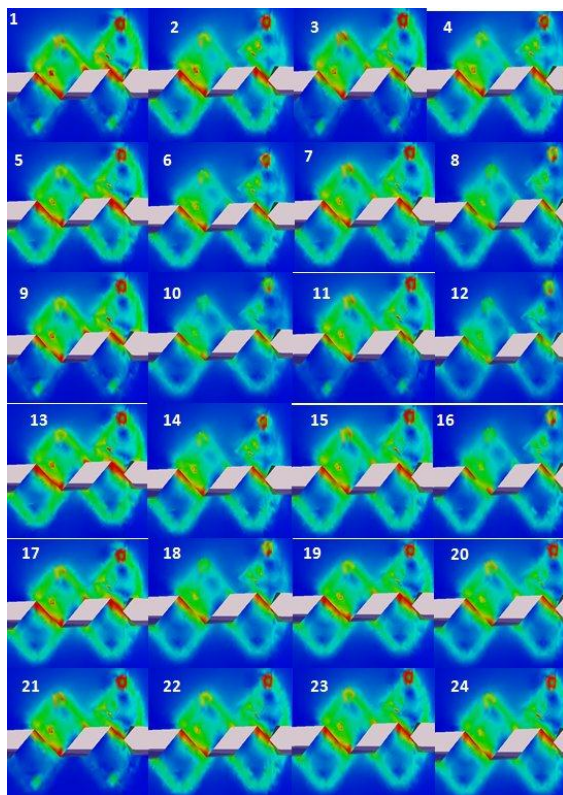
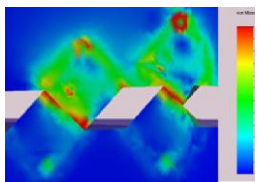
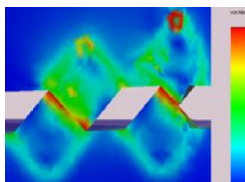


Рисунок 3 – Результаты расчетов процесса правки алмазного круга по матрице В4

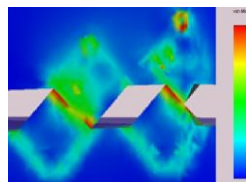
В программном пакете *CosmosWorks* по результатам экспериментов были получены эпюры распределения полей напряжений в зависимости от всех оптимальных значений факторов: модуля упругости связки шлифовального круга $E_{кр}$ (рис. 4); температуры правки T (рис. 5); модуля упругости связки правящего ролика E_p (рис. 6); коэффициента теплового расширения металлофазы алмазного зерна правящего ролика α_p (рис. 7).



Модуль упругости связки шлифовального круга
 $E_{кр} = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 4,33 \text{ ГПа}$

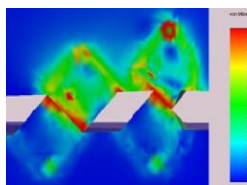


Модуль упругости связки шлифовального круга
 $E_{кр} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 3,27 \text{ ГПа}$

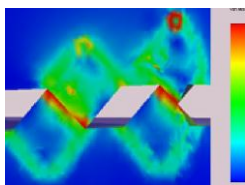


Модуль упругости связки шлифовального круга
 $E_{кр} = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 1,73 \text{ ГПа}$

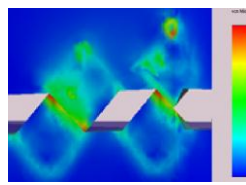
Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от модуля упругости связки шлифовального круга



Температура правки
 $T = 620 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\sigma_{экв} = 3,67 \text{ ГПа}$

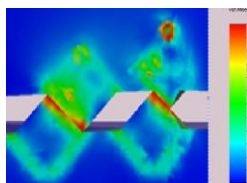


Температура правки
 $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\sigma_{экв} = 3,45 \text{ ГПа}$

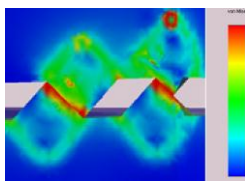


Температура правки
 $T = 480 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\sigma_{экв} = 2,18 \text{ ГПа}$

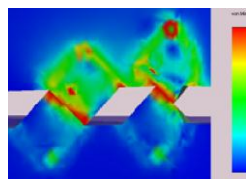
Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от температуры правки



Модуль упругости связки правящего ролика
 $E_p = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 1,75 \text{ ГПа}$

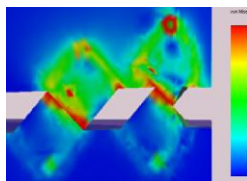


Модуль упругости связки правящего ролика
 $E_p = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 3,42 \text{ ГПа}$

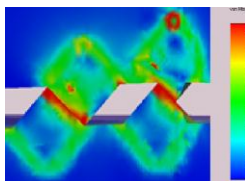


Модуль упругости связки правящего ролика
 $E_p = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ $\sigma_{экв} = 3,67 \text{ ГПа}$

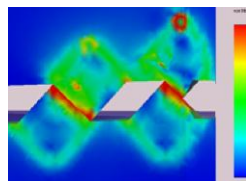
Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от модуля упругости связки правящего ролика



КТР металлофазы
алмазного зерна
правящего ролика
 $\alpha_p = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$
 $\sigma_{\text{экв}} = 3,67 \text{ ГПа}$



КТР металлофазы
алмазного зерна
правящего ролика
 $\alpha_p = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$
 $\sigma_{\text{экв}} = 3,59 \text{ ГПа}$



КТР металлофазы
алмазного зерна
правящего ролика
 $\alpha_p = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$
 $\sigma_{\text{экв}} = 3,42 \text{ ГПа}$

Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений в зависимости от КТР металлофазы алмазного зерна правящего ролика

Визуализация проведенных расчетов дает возможность проанализировать распределение эквивалентных напряжений в зоне правки и сделать следующие выводы:

- с ростом величины модуля упругости связки шлифовального круга, растут и напряжение в зоне контакта ролика и круга: повышение модуля упругости с $0,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ до $1,9 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ приводит к росту напряжений с $1,73 \text{ ГПа}$ до $3,61 \text{ ГПа}$;

- значительное влияние на процесс правки оказывает температура в местах контакта алмазных зерен правящего ролика и шлифовального круга. При высокой температуре повышается интенсивность износа зерен шлифовального круга и правящего ролика, при этом понижается механическая прочность связки круга, что приводит к выпадению его зерен и потере абразивной способности алмазного круга. При изменении температуры от $480 \text{ }^\circ\text{C}$ до $620 \text{ }^\circ\text{C}$, напряжения изменяются с $1,73 \text{ ГПа}$ до $3,67 \text{ ГПа}$, что свидетельствует о необходимости применения охлаждения в процессе правки;

- с увеличением модуля упругости связки правящего ролика, растут эквивалентные напряжения в зоне контакта зерен круга и ролика, что должно способствовать повышению эффективности правки;

- влияние изменения КТР металлофазы алмазного зерна ролика на состояние системы «связка ролика–алмазное зерно ролика–металлофаза–алмазное зерно круга–связка круга» таково, что целесообразным является применение в ролике алмазных зерен с металлофазой, преобладающим элементом в составе которой является металл с низким коэффициентом теплового расширения.

Предложенная методология исследования позволяет расчетным путем определить рациональные сочетания физико-механических свойств материалов связок, марок алмазных зерен правящего ролика и

шлифовального круга, а также режимов обработки, при которых будут реализованы наилучшие условия процесса правки.

Список использованных источников: 1. *Азарова Н. В.* Влияние способа правки алмазного круга на характеристики его рабочей поверхности / *Н. В. Азарова, П. Г. Матюха* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2007. – С. 16-20. 2. *Абрамская И. Б.* Устройство для оптимизации процесса правки шлифовального круга на металлической связке / *И. Б. Абрамская, О. Ф. Еникеев, О. В. Суботин, Л. О. Шищенко* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2004. – Вып. 16. – С. 183–186. 3. *Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф.* Планирование эксперимента. – Минск: изд-во БГУ, 1982. – 302 с. 4. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов/ *А. А. Спиридонов.* – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Azarova N.V.* Vlijanie sposobu pravki almaznogo kruga na karakteristiki ego rabochej poverhnosti / *N.V. Azarova, P.G. Matjuha* // Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: Mashinobuduvannja i mashinoznavstvo. – 2007. – S. 16-20. 2. *Abramskaja I.B.* Ustrojstvo dlja optimizacii processu pravki shlifoval'nogo kruga na metallicheskoj svjazke / *I.B. Abramskaja, O.F. Enikeev, O.V. Subotin, L.O. Shishenko* // Nadezhnost' instrumenta i optimizacija tehnologičeskijh sistem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2004. – Vyp. 16. – S. 183-186. 3. *Krasovskij G.I., Filaretov G.F.* Planirovanie jeksperimenta. – Minsk: izd-vo BGU, 1982. – 302 s. 4. *Spiridonov A. A.* Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologičeskijh processov/ *A.A. Spiridonov.* – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s.