

Ф.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко

ОБ УСЛОВИЯХ САМОЗАТАЧИВАНИЯ АЛМАЗНОГО КРУГА
(Харьковский политехнический институт)

Несмотря на интенсивное развитие комбинированных процессов алмазного шлифования, основной объем алмазного шлифования выполняется в условиях, характеризующихся работой в режиме самозатачивания. Такое шлифование обладает рядом преимуществ и благодаря появлению новых самозатачиваемых металлических связей успешно конкурирует с процессами, основанными на введении в зоны резания дополнительных видов энергии.

При работе круга в режиме самозатачивания его рабочая поверхность не требует правок и формируется непосредственно в процессе взаимодействия с обрабатываемым материалом, что позволяет длительное время поддерживать высокую режущую способность круга. Процесс самоформления режущего рельефа круга – сложное явление, единое мнение о котором до настоящего времени отсутствует. В статье приведены результаты исследования механизма самоформления режущего рельефа круга и его износа с позиций энергетического равновесия элементов системы круг–изделие.

Согласно принципу энергетического равновесия режим самозатачивания круга возможен при равенстве энергии резания и энергии, потребляемой на восстановление режущих свойств круга. Для постоянного обновления режущего рельефа необходимо, чтобы энергии резания было достаточно для разрушения изношенных зерен или вываливания их из связки. Сила резания на максимально выступающем зерне должна равняться силе разрушения зерна или превышать ее, в противном случае круг будет работать в режиме притупления и его необходимо править.

Для установления условий стабилизации режущего рельефа круга, при которых в системе круг-изделие наступает энергетическое равновесие, воспользуемся аналитическими решениями, полученными в работе [1] применительно к врезному шлифованию прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью $V_{изд}$. В расчетной схеме величина площадки износа на зерне зависит от толщины слоя металла, срезаемого этим зерном. Исходный закон равновысотности вершин зерен, принятый равномерным, в процессе шлифования трансформируется в нормальный согласно распределению площадок износа. Выражение для максимальной глубины внедрения металла в рабочую поверхность круга H , отсчитываемой от вершины исходного максимально выступающего зерна (рис. 1) и обуславливающей образование на поверхности образца полного профиля, т.е. полный сьем металла, имеет вид

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot V_{изд} \cdot [\sigma]}{k \cdot V_{кр} \cdot \rho}, \quad (1)$$

где b – максимальная высота выступающего зерна, мм;
 k – поверхностная концентрация зерен, шт/мм²;
 $V_{кр}$, $V_{изд}$ – соответственно скорость круга и изделия, м/с;
 P – сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, Н;
 $[\sigma]$ – условное напряжение резания, Н/мм².

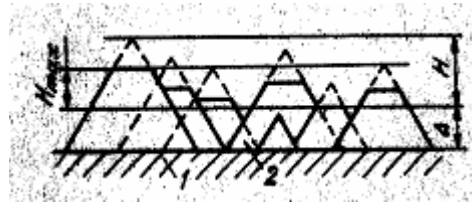


Рис. 1 Расчетная схема: 1 – связка круга; 2 – алмазные зерна

Анализ (1) показывает, что при одном и том же значении производительности шлифования, определяемой $V_{изд}$, сила резания, действующая на единичное зерно, может принимать различные значения в зависимости от степени сглаживания рельефа круга. Так, в начальный момент шлифования, когда круг имеет развитый рельеф, параметр H невелик, а сила резания на максимально выступающем зерне принимает наибольшее значение, что и предопределяет повышенный износ круга. С течением времени из-за увеличения линейного износа зерен и образования более сглаженного рельефа круга максимальная толщина среза H_{max} уменьшается [1] и снижает силы резания на единичных зернах, что, в свою очередь, уменьшает износ круга. Такая закономерность образования режущего рельефа будет справедлива до тех пор, пока действующая на максимально выступающее зерно сила резания не достигнет силы разрушения зерна и объемно его не разрушит, после чего включается в работу новое зерно, расположенное на более низком уровне. При установившемся равновесии в системе круг–изделие режущий рельеф круга примет устойчивое стабильное состояние и износ круга во времени будет оставаться практически неизменным. Удельный расход алмазов, как показано в работе [1], с увеличением $V_{изд}$ уменьшится, а условные напряжения резания возрастут.

Описанный механизм износа круга и самозатачивания его режущего рельефа будет иметь место при изменении $V_{изд}$ до определенного значения, после чего в связи с уменьшением прочности удержания зерен в связке сила разрушения зерна превысит силу удержания его в связке. Преобладающим видом износа в этих условиях станет вываливание неразрушенных зерен из связки, хотя одновременно часть зерен будет все же объемно разрушаться. Условием энергетического равновесия при таком механизме износа круга будет равенство силы резания на максимально выступающем зерне и силы, удерживающей это зерно в связке.

Для установления закономерностей изменения параметра H рассмотрим схему круглого продольного шлифования и предположим, что сила удержания зерна в связке изменяется следующим образом:

$$P = P_0 - \alpha[(H + \Delta) - b], \quad (2)$$

где P_0 – сила разрушения зерна, Н;

$$\Delta = \frac{V_{изд}}{V_{кр}} \cdot z - \text{толщина слоя стружки, заполняющей межзеренное пространство круга, мм;}$$

z – глубина шлифования, мм;

α – размерный коэффициент.

Радиальная скорость внедрения металла в рабочую поверхность круга [2]:

$$V'_{изд} = V_{изд} \cdot \sqrt{2 \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}, \quad (3)$$

где R_1, R_2 – соответственно радиус изделия и круга, мм.

После подстановки (2) и (3) в (1) и решения квадратного уравнения

$$H = \frac{1}{2 \cdot \alpha} (P_0 - \alpha \cdot \Delta + \alpha \cdot b) \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot \alpha^2} (P_0 - \alpha \cdot \Delta + \alpha \cdot b)^2 - \frac{9 \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot z} \cdot [\sigma] \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (4)$$

При выборе знака в (4) необходимо исходить из того, что с ростом $V_{изд}$ или z второе слагаемое в подкоренном выражении должно уменьшать H , а первое – увеличивать, что выполняется при знаке “–”. Для упрощения зависимости (4) умножим и разделим ее на величину, сопряженную H :

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot z} \cdot [\sigma] \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр} \left[\frac{1}{2\alpha} (P_0 - \alpha\Delta + \alpha b) + \sqrt{\frac{1}{4\alpha^2} (P_0 - \alpha\Delta + \alpha b)^2 - \frac{9b\sqrt{2z}[\sigma]\sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр}}} \right]} \quad (5)$$

Так как с изменением режимных параметров $V_{изд}$ и z второе слагаемое подкоренного выражения, определяющее высоту выступания зерен над связкой, по сравнению с первым слагаемым изменяется менее интенсивно, то им можно пренебречь. Тогда зависимость (5) упростится:

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot z} \cdot [\sigma] \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{k \cdot V_{кр} \cdot (P_0 - \alpha \cdot \Delta + \alpha \cdot b)}. \quad (6)$$

Анализ (6) показывает уменьшение H с ростом z , что приводит к уменьшению линейного износа зерен до момента их выпадения из связки и, согласно (2), к возрастанию единичных сил резания. Полученный результат обусловлен тем, что с ростом производительности шлифования снижение глубины заделки зерна в связке происходит менее интенсивно по сравнению с ростом

объема межзеренного пространства, необходимого для свободного размещения слоя стружки Δ . Режущие зерна работают в режиме перегрузок, поскольку сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, всегда больше разрушающей силы, что определяет повышенный расход алмаза.

Необходимо отметить, что полученный результат является заниженным, так как в расчетах объем стружки заменяется объемом жидкости. В реальном процессе шлифования с ростом производительности параметр H должен уменьшаться более интенсивно и вызывать более интенсивный рост износа круга. Этому способствует также тот факт, что сила удержания зерна в связке менее чувствительна к изменению параметра H , чем это принято в формуле (2). Таким образом, независимо от изменения режимных параметров сила удержания максимально выступающего зерна в связке приблизительно равна разрушающей силе, а глубина заделки зерна остается приблизительно постоянной. Высота выступания зерен над связкой с увеличением $V_{изд}$, z возрастает, максимальная толщина среза, согласно работе [1]:

$$H_{max} = \frac{P}{[\sigma] \cdot H} \cdot \frac{1}{\left[1 + \sqrt{1 - \frac{P}{[\sigma] \cdot H^2}} \right]} \quad (7)$$

шероховатость обработанной поверхности также увеличивается.

Анализируя зависимость параметра H от $V_{изд}$ и z , можно видеть, что $V_{изд}$ оказывает меньшее влияние на H и поэтому следует ожидать менее интенсивный рост износа круга с увеличением $V_{изд}$. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости q от $V_{изд}$ и z для многопроходного шлифования стали ШХ15 (HRC 58–60) кругами АПП 200x10x3 АСК 125/100 – 100% МВ1, полностью подтверждающие теоретические результаты. Во всем диапазоне изменения режимных параметров наблюдается непрерывный рост q . Полученные данные хорошо согласуются с данными работы [3], в которой по анализу шлама, собранного после шлифования, показано, что с ростом производительности увеличивается число неразрушенных зерен, т.е. под действием повышенных сил резания зерна выпадают из связки в основном без разрушения и образования значительных микросколов. Экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности также подтверждают теоретические результаты. Параметр R_a растет с увеличением режимных параметров $V_{изд}$ и z . С увеличением $V_{кр}$ параметр H по зависимости (6) возрастает, что связано с уменьшением толщины слоя стружки Δ . Рост H приводит к уменьшению силы резания, действующей на максимально выступающее зерно, и уменьшению износа круга. Шероховатость обработанной поверхности с ростом $V_{кр}$ снижается, поскольку уменьшается максимальная толщина среза H_{max} . Аналогично проявляется влияние концентрации зерен в круге.

Установим характер изменения параметра H , износа круга и шероховатости обработанной поверхности в зависимости от прочности алмазных зерен и

связки. Как следует из формулы (6), с ростом прочности зерна P_0 параметр H уменьшается и увеличивает силу резания на единичном зерне. Однако интенсивность нарастания силы резания меньше интенсивности роста собственно прочности зерен, так как в выражении (6) сила P_0 не вызывает пропорционального изменения H . Поэтому износ круга с увеличением P_0 уменьшится, а критическая глубина заделки зерна в связке, максимальная толщина среза H_{max} и шероховатость обработанной поверхности возрастут. В таблице приведены экспериментальные данные для алмазных кругов из зерен АСВ и АСК, которые показывают, что для более прочных зерен АСК удельный расход алмазов меньше, а параметр шероховатости R_a выше.

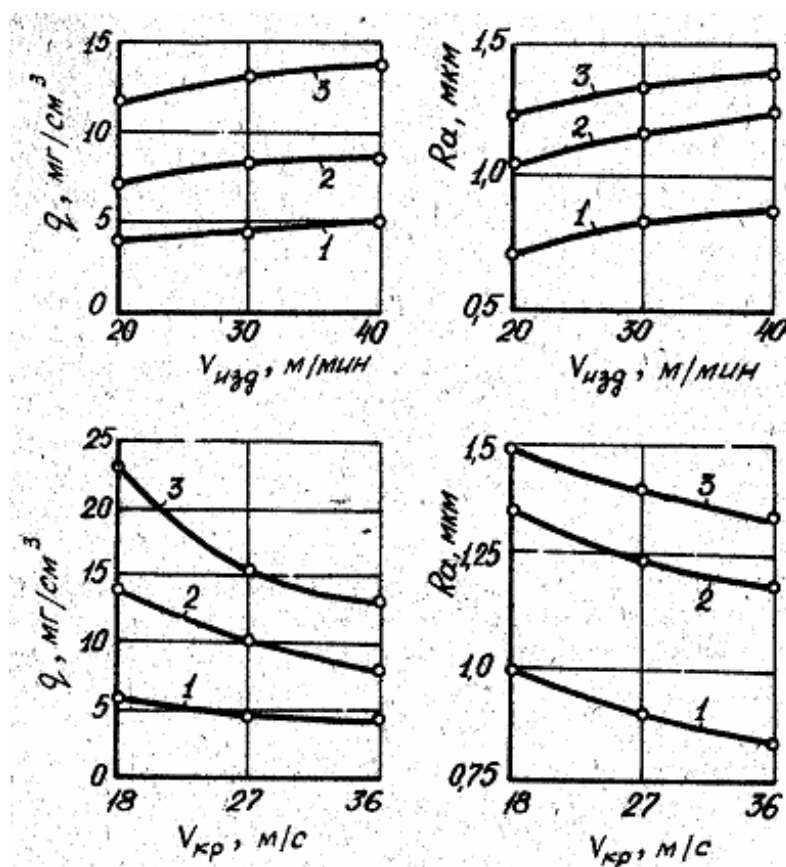


Рис. 2. Удельный расход алмазов и шероховатость обработанной поверхности закаленной стали ШХ15 при различной глубине шлифования:
 1 – 0,005 мм/дв.ход; 2 – 0,015 мм/дв.ход; 3 – 0,025 мм/дв.ход

Механизм влияния свойств связки на износ следующий. С увеличением прочности связки уменьшается критическая глубина заделки зерна в связке, оно может получить больший линейный износ до выпадания из связки, т.е. параметр H возрастает. Сила резания на максимально выступающем зерне при этом уменьшается и приводит к снижению износа круга. На рабочей поверхности круга образуется более сглаженный рельеф, шлифование которым снижает шероховатость обработанной поверхности.

Зависимость удельного расхода алмазов и шероховатости
обработанной поверхности закаленной стали ШХ15 от марки
алмазов и связки круга (зернистость 125/100, концентрация 100%)

z мм/дв.ход	Марка алмазов	Связка	q , мг/см ³	R_a , мкм
0,005	АСК	МО4	5,6	0,95
	АСК	МВ1	4,2	0,83
	АСВ	МВ1	5,4	0,76
0,015	АСК	МО4	12,3	1,25
	АСК	МВ1	8,0	1,18
	АСВ	МВ1	14,2	1,02
0,025	АСК	МО4	23,8	1,48
	АСК	МВ1	13,1	1,33
	АСВ	МВ1	32,0	1,28

Таким образом, применение энергетического принципа к анализу процесса шлифования позволяет вскрыть механику формирования рельефа алмазного круга в условиях самозатачивания и его износа.

Список литературы

1. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа круга в процессе шлифования. – В кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях. Харьков: ХАИ, 1982, с. 43–46.
2. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Кинематические соотношения параметров процесса шлифования изделий с прерывистыми поверхностями. – Резание и инструмент, 1980, вып. 24, с. 99-105.
3. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля, Киев: Наукова думка, 1976. – 350 с.