

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.05

УДК 621.923.1.001.573

А.В. МорозовВладимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗНОСА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ ПРАВКЕ ДИСКРЕТНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Определен объект исследования – процесс износа дорогостоящего алмазного инструмента, используемого при правке сплошных и дискретных шлифовальных кругов. Приведены результаты исследования абсолютного и относительного износа алмазных зерен при правке шлифовальных кругов с различными способами и схемами дискретизации режущей поверхности и при различных режимах резания.

Износ алмазного инструмента в процессе правки шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью изучен достаточно подробно. Однако исследованию износа алмазных зерен при правке дискретных шлифовальных кругов не уделялось должного внимания, что не позволяло принимать обоснованные решения относительно режимов правки дискретной режущей поверхности шлифовальных кругов и требуемого расхода дорогостоящего правящего инструмента.

В первую очередь это касается основополагающего показателя – относительного износа алмазного инструмента при обработке абразивного материала шлифовальных кругов. В настоящее время в научно-технической литературе нет информации по численному значению относительного износа правящего инструмента, приведены его значения для лезвийного режущего инструмента, выполненного из твердого сплава и инструментальных сталей.

Определен относительный износ алмазного инструмента при обработке абразивного материала шлифовальными кругами со сплошной режущей поверхностью. Получено уравнение регрессии, связывающее значение относительного износа алмазного правящего инструмента с глубиной резания при правке шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью.

Полученное значение относительного износа позволяет разработать методику расчета абсолютного износа алмазного правящего инструмента при правке шлифовальных кругов с дискретной режущей поверхностью. Методика необходима при проектировании технологических операций дискретного шлифования металлов и сплавов.

Ключевые слова: алмазный инструмент, абразивный материал, правка, шлифовальный круг, относительный износ, абсолютный износ, алмазное зерно, дискретная режущая поверхность, режим резания, уравнение регрессии, методика расчета.

A.V. MorozovVladimir State University named under A.G. and N.G. Stoletovych
Vladimir, Russian Federation**CALCULATION METHOD OF THE DIAMOND TOOL
DETERIORATION AT DISCRETE GRINDING WHEELS RULING**

Researching object – the expensive diamond tool deterioration used at ruling of continuous and discrete grinding wheels is defined. Researching results of absolute and relative deterioration of diamond grains during grinding wheels ruling on various cutting regimes are presented.

The diamond tool deterioration during grinding wheels ruling with a continuous cutting surface is studied in detail. However, deterioration researching of diamond grains at discrete grinding wheels ruling was not given proper attention that did not allow to make well-founded solutions concerning editing regimes of a discrete cutting surface and the demanded expenses of the expensive ruling tool.

First, it concerns the fundamental indicator – the of diamond tool relative deterioration during the processing of abrasive grinding wheels material. Now in the scientific and technical literature there is no data on relative deterioration of the ruling tool, its values only for an edge cutting tool executed from a firm alloy and a tool steel are presented.

The diamond tool relative deterioration during the processing of grinding wheels abrasive material with continuous cutting surface was determined. The regression equation connecting value of relative deterioration of the diamond ruling tool with a cutting depth at grinding wheels editing with a continuous cutting surface was obtained.

The received value of relative deterioration allows to develop a calculating method of the diamond ruling tool absolute deterioration at editing of grinding wheels with a discrete cutting surface which is necessary for technological operations designing of metals and alloys discrete grinding.

Keywords: diamond tool, abrasive material, ruling, grinding wheel, relative deterioration, absolute deterioration, diamond grain, discrete cutting surface, cutting regime, the regression equation, a calculating method.

При механической обработке деталей машин шлифовальные круги, как и иной режущий инструмент, изнашиваются, при этом характер и интенсивность изнашивания зависят от физико-механических характеристик обрабатываемого материала, инструмента, режима его работы и др. Режим работы шлифовальных кругов определяется твердостью шлифовального круга – способностью связки удерживать абразивные зерна в инструменте. Различают три основных режима работы шлифовальных кругов: частичного самозатачивания, полного замозатачивания и затупления.

Режим частичного самозатачивания характеризуется тем, что под действием силы резания, возникающей в процессе снятия обрабатываемого материала заготовки, абразивные зерна затупляются, сила резания возрастает, в результате чего отдельные режущие зерна разрушаются, происходит вырывание отдельных частиц или целых абразивных зерен из связки. Часть режущих зерен удерживается связкой и продолжает выполнять процесс резания.

С течением времени шлифования процесс самозатачивания режущей поверхности продолжается, при этом геометрия режущей поверхности, образованная в процессе первой правки шлифовального круга, ухудшается, что сказывается на увеличении шероховатости и волнистости шлифованных поверхностей деталей.

Для обеспечения требуемых значений шероховатости и волнистости шлифованных поверхностей круг периодически правят путем снятия тонкого слоя абразива с рабочей поверхности инструмента,

при этом режущие зерна обновляются и процесс обработки можно продолжать.

Полное самозатачивание отличается от частичного тем, что при затуплении режущих и давящих абразивных зерен из инструмента вырываются как отдельные зерна, так и целые блоки зерен со связкой, при этом в процессе шлифования режущая поверхность сначала частично, а затем и полностью обновляется с появлением новых нижележащих зерен, способных к выполнению процесса резания.

Шлифовальный круг в процессе полного самозатачивания самостоятельно обновляет свою режущую поверхность и может работать до полного износа без периодических правок, однако геометрия шлифованной поверхности при этом ухудшается. Обработка заготовок шлифовальным кругом с постоянно ухудшающимся профилем характеризуется сравнительно высокой микро- и макрогеометрией шлифованных поверхностей, поэтому режим частичного и в особенности полного самозатачивания используют при черновой обработке деталей с невысокими требованиями к обработанным поверхностям.

Высокая точность ответственных деталей, малая шероховатость и волнистость обработанных поверхностей достигаются в процессе работы шлифовальных кругов в режиме затупления, когда режущие и давящие абразивные зерна прочно удерживаются связкой в шлифовальном круге, что позволяет в основном сохранить профиль инструмента, сформированного при первой правке. Благодаря этому ухудшения геометрии режущей поверхности инструмента, как в случае частичного и полного ее самозатачивания, не происходит.

На абразивных зернах шлифовального круга, работающего в режиме затупления, возникают площадки износа, возрастает трение между зернами и обрабатываемым металлом, под действием которого повышается температура и происходит расплавление тончайшего поверхностного слоя заготовки. Расплавленный металл прочно сцепляется с абразивными зернами, обволакивая их выступающие вершины и проникая при дальнейшем шлифовании в поры шлифовального круга. Происходит так называемое засаливание режущей поверхности, при которой круг полностью теряет свою режущую способность, а для ее восстановления проводят правку инструмента дорогостоящими алмазными карандашами, роликами или гребенками.

Таким образом, большинство шлифовальных кругов, применяемых в процессах плоского, круглого наружного, внутреннего и бесцен-

трово́го шлифования, нуждаются в периодических правках режущей поверхности.

Дискретные шлифовальные круги характеризуются наличием на рабочей поверхности режущих абразивных участков и участков, кратковременно и периодически прерывающих процесс шлифования. Эти инструменты обеспечивают значительное снижение температуры в зоне шлифования, что положительно сказывается на повышении физико-механических показателей качества шлифованного поверхностного слоя деталей, одновременно с этим они характеризуются большим ресурсом работы по сравнению со стандартными кругами со сплошной режущей поверхностью [1]. По названным и ряду других преимуществ дискретные шлифовальные круги находят практическое применение при обработке высоколегированных закаленных до высокой твердости инструментальных, подшипниковых сталей, твердых сплавов и др. [2].

Дискретную режущую поверхность цельного шлифовального круга с выступами и впадинами получают вырезанием или прессованием пазов, а дискретизацию режущей поверхности сборного шлифовального круга – размещением абразивных сегментов по периферии корпуса на определенном расстоянии друг от друга, что обеспечивает высокочастотное периодическое прерывание процесса шлифования заготовки [3].

В США разработан способ дискретизации режущей поверхности шлифовального круга путем создания на периферийной режущей поверхности большого количества поверхностных неровностей (выступов), предназначенных для проведения операций чернового шлифования, зачистки и удаления поверхностных дефектов стальных слитков, блюмов, заготовок и т.д. Для формирования выступов в абразивном круге используют пресс-форму, в которой расположена гильза с отверстиями, представляющая собой перфорированное кольцо, удаляемое из пресс-формы после окончания процесса прессования дискретного шлифовального круга¹.

Круг с множеством поверхностных неровностей (выступов) позволяет облегчить операцию чернового шлифования и свести к минимуму чрезмерное давление на заготовку в ходе ее зачистки. Использование описанного шлифовального круга значительно облегчает работу оператора, поскольку сила прижатия заготовки к дис-

¹ Пат. 2187425 США. МПК: C2, B24D 18/00, 5/00, B28B 7/20.

кретной режущей поверхности вращающегося инструмента существенно уменьшается.

Вместе с этим работа дискретного шлифовального круга² приводит к значительным скачкам силы резания от максимального значения, когда заготовка контактирует с выступами круга, до нулевого значения, когда контакт отсутствует. Скачкообразное изменение силы резания является причиной высокого уровня вибрации шпиндельного узла, снижения геометрической точности шлифованных поверхностей и снижения производительности процесса обработки, поэтому этот инструмент используют при выполнении обдирочных работ.

Динамика дискретного шлифования в значительной степени зависит от принятой схемы дискретизации режущей поверхности и времени обработки [4, 5], с увеличением которого изменение силы резания уменьшается, что объясняется формированием после каждой правки заборной поверхности на режущих участках инструмента [6]. Тем не менее основное время цикла обработки изделия характеризуется повышенным уровнем вибрации технологической системы.

Способ дискретизации абразивного круга путем нанесения на режущую цилиндрическую поверхность лазерным лучом большого числа радиальных отверстий диаметром 1,5–3,5 мм парами строк позволяет уменьшить пределы изменения силы резания, что положительно сказывается на снижении уровня вибрации шпиндельного узла³ [7, 8]. Недостатками этого способа дискретизации является высокая тепловая напряженность процесса выжигания отверстий, что приводит к образованию прижогов в зоне радиальных отверстий, появлению цветов побежалости и локальных вспучиваний в абразивном материале.

Возникают необратимые изменения в структуре абразивного инструмента, которые снижают его механическую прочность и вызывают разрушение изготовленного дискретного шлифовального круга в процессе испытания на механическую прочность на специальном стенде путем вращения круга на частоте, превышающей рабочую частоту в 1,5 раза.

Чтобы избежать структурных изменений в абразивном материале инструмента, уменьшают плотность мощности лазерного излучения, а прожигание отверстий выполняют парами строк за несколько проходов

² Пат. 2187425 США. МПК: С2, В24D 18/00, 5/00, В28В 7/20.

³ Пат. 2385216 Рос. Федерация. МПК: В24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С.

с перемещением лазерного луча на скорости холостого хода от отверстий одной строки к отверстиям другой, однако это приводит к снижению производительности процесса дискретизации абразивного инструмента.

Указанных недостатков можно избежать, если в качестве высококонцентрированного потока энергии использовать гидроабразивную струю высокого давления, а радиальные отверстия наносить друг за другом в направлении одной строки⁴ [9].

Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов высококонцентрированными потоками энергии была реализована путем вырезания системы радиальных отверстий в теле стандартных шлифовальных кругов, при этом у каждого круга была сформирована перфорированная периферийная режущая поверхность.

Рассмотренные патенты, а также исследования [1–9] и др. свидетельствуют об успешном применении процессов дискретного шлифования металлов и сплавов при производстве различных изделий машиностроения, приборостроения, подшипниковой, автотракторной и металлургической промышленности и о необходимости дальнейшего их совершенствования, что предполагает исследование еще не изученных, но весьма важных явлений дискретного шлифования, в частности изнашивания дорогостоящих алмазных инструментов.

Износ алмазного инструмента в процессе правки стандартных шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью изучен достаточно подробно, однако исследованию износа алмазных зерен при правках перспективных дискретных шлифовальных кругов не уделялось должного внимания, что не позволяет принимать обоснованные решения относительно режимов правки дискретной режущей поверхности шлифовальных кругов, требуемого расхода дорогостоящего правящего инструмента и прогнозировать технологическую себестоимость выполнения конкретных шлифовальных операций.

В первую очередь это касается основополагающего показателя – относительного износа алмазного инструмента. В настоящее время в научно-технической литературе не содержится информации по численному значению относительного износа правящего инструмента при обработке не только дискретных, но и сплошных шлифовальных кругов. Известны значения относительного износа для лезвийного твердо-

⁴ Пат. 2520169 Рос. Федерация. МПК В24D 18/00, В24С 1/00. Способ дискретизации абразивного инструмента // Гусев В.Г., Морозов А.В., Метелкин О.Ю.

сплавного режущего инструмента и инструмента, выполненного из инструментальных сталей при механической обработке различных марок сталей, чугунов и цветных металлов [10]. В этой связи разработка методики расчета абсолютного износа алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов является обоснованной и необходимой при выполнении проектных процедур.

Сначала необходимо определить относительный износ алмазного инструмента при правке сплошных шлифовальных кругов и на основании этих данных с учетом специфики дискретного шлифования разработать методику расчета износа алмазных зерен при правке кругов с различными схемами дискретизации режущей поверхности.

Для определения относительного износа u_0 алмазного правящего инструмента проведена серия экспериментов, заключающаяся в правке стандартных шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью ПП 250×(25–32)×72 25А(F40–F60)(К–М)6V (ГОСТ P52381–2005, ГОСТ P52587–2006)⁵.

Режим правки: скорость резания $v = 35$ м/с, скорость продольной подачи правящего алмазного карандаша слоистого типа $v_s = 200 \dots 800$ мм/мин, глубина резания $t = 0,005 \dots 0,020$ мм. Выполняли 30–50 проходов правки для каждого режима, что обусловлено незначительным износом правящего инструмента после одного прохода правки и невозможностью регистрации ввиду его малости на длинномере с ценой деления 0,1 мкм.

На основании известных размеров режущей поверхности шлифовального круга и скорости продольной подачи (мм/об.) определен путь, проходимый алмазными зернами в абразиве шлифовального инструмента. Относительный износ (мкм/км) определен как отношение экспериментально измеренного абсолютного износа (мкм) к длине найденного пути (км).

В результате проведенных экспериментов установлено, что относительный износ алмазного карандаша в процессе правки шлифовальных кругов не является постоянной величиной и изменяется в зависимости от глубины резания, скорости продольной подачи правящего карандаша и характеристики абразивного материала круга.

⁵ Здесь ПП – прямой профиль шлифовального круга; 250 – наружный диаметр, мм; 25–32 – высота (ширина), мм; 72 – диаметр посадочного отверстия круга, мм; 25А – марка абразивного материала (электрокорунд белый); F40–F60 – значения зернистости; К–М – значения твердости круга; 6 – структура круга; V – керамическая связка.

Значения относительного износа алмазного инструмента при правке сплошного шлифовального круга в функции глубины резания представлены ниже. Влияние скорости продольной подачи алмазного карандаша на величину его износа проявляется через длину пути алмазных зерен карандаша в абразивном материале шлифовального круга.

Относительный износ алмазного правящего карандаша при правке сплошного шлифовального круга в функции глубины резания

t , мм	0,005	0,010	0,015	0,020
u_0 , мкм/км	0,80	0,97	1,20	1,37

На основании данных получено уравнение регрессии, связывающее значение относительного износа алмазного правящего инструмента с глубиной резания t при правке шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью:

$$u_0 = 38t + 0,6. \quad (1)$$

Линейное уравнение (1) свидетельствует о том, что износ алмазного правящего инструмента при обтачивании шлифовальных кругов с указанными выше характеристиками является абразивным.

Полученное значение относительного износа позволяет разработать методику расчета абсолютного износа алмазного правящего инструмента при правке шлифовальных кругов с различными схемами дискретизации режущей поверхности.

Исследовали износ алмазного карандаша при правке шлифовального круга, выполненного в виде чередующихся выступов и впадин; сборного круга в виде абразивных сегментов, установленных в металлическом корпусе с окружным шагом, при котором образуются воздушные промежутки между соседними сегментами, что позволяет прерывать процесс резания; шлифовального круга с дискретной режущей поверхностью, выполненной с использованием высококонцентрированных потоков энергии: лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления.

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований износа алмазного правящего инструмента при правках сплошных шлифовальных кругов и кругов с различными способами и схемами дискретизации режущей поверхности позволил разработать адекватную методику расчета износа, пригодную для практического использования при выполнении проектных процедур технологических операций дис-

кретного шлифования различных материалов. В соответствии с этой методикой расчет износа алмазного правящего инструмента выполняем в изложенной ниже последовательности:

1. Выбираем модель шлифовального станка для выполнения технологической операции шлифования заданного изделия, при этом становятся известными частота вращения n и размеры шлифовального круга (диаметр D и высота B режущей цилиндрической поверхности), допускаемые станком. Зная диаметр D и частоту вращения шпинделя n , на котором крепится круг, определяем скорость резания по известной формуле [10].

2. Выбираем схему дискретизации режущей поверхности шлифовального круга; для обдирочных, зачистных и черновых технологических операций (ТО) выбираем инструмент⁶: для предварительных и получистовых ТО – сборный круг или круг в виде чередующихся выступов и впадин; для чистовых и окончательных ТО – инструмент [7, 8] (для радиальных отверстий диаметром до 2 мм), и инструмент [9] (для радиальных отверстий диаметром более 2 мм).

3. На основании известной схемы дискретизации режущей поверхности и ее габаритных размеров определяем согласно работам [1–3] размеры и последовательность расположения режущих участков и участков, прерывающих процесс резания, на рабочей поверхности дискретного шлифовального круга.

4. Выбираем тип алмазного правящего карандаша: со слоистым расположением алмазных зерен (тип С) для правки шлифовального круга, обеспечивающего чистовое шлифование поверхностей; с цепочным расположением алмазных зерен (тип Ц) для окончательного шлифования с высокой геометрической точностью шлифованных поверхностей (например, поверхностей деталей подшипников качения).

5. Назначаем режим резания при правке дискретного шлифовального круга: скорость резания определяем по частоте вращения шпинделя и диаметру режущей поверхности, скорость продольной подачи выбираем из условия обеспечения требуемой шероховатости поверхности, подвергаемой шлифованию, по работе [10] в пределах 120–600 мм/мин; глубину резания $t = 0,010$ мм при черновых проходах правки (1 или 2 прохода в зависимости от степени засаливания круга), при чистовом проходе правки $t = 0,005$ мм.

⁶ Пат. 2187425 США. МПК: С2, В24Д 18/00, 5/00, В28В 7/20.

6. По уравнению (1) вычисляем значение относительного износа u_0 при правке шлифовального круга со сплошной режущей поверхностью.

7. Вычисляем абсолютный износ алмазного инструмента при правке дискретного шлифовального круга с выступами и впадинами по формуле

$$u_1 = \frac{u_0 B n}{10^6 v_s k} (\pi D k - b n_1), \quad (2)$$

где u_0 – относительный износ алмазного правящего инструмента, мкм/км, вычисленный по п. 6; B , D – соответственно высота и диаметр режущей поверхности дискретного шлифовального круга, мм; n – частота вращения круга, мин⁻¹; v_s – скорость продольной подачи алмазного правящего инструмента, мм/мин; k – отношение окружной протяженности b режущего выступа к окружной протяженности a впадины; n_1 – число абразивных выступов (сегментов) дискретного шлифовального круга.

8. Назначаем радиус r радиальных отверстий: для шлифовального круга с лазерной дискретизацией режущей поверхности $r = 0,5 \dots 1,0$ мм в зависимости от высоты и диаметра круга, меньшие значения радиуса выбираем для шлифовальных кругов с высотой $B \leq 32$ мм, $D \leq 250$ мм; для шлифовального круга с дискретизацией режущей поверхности гидроабразивной струей высокого давления $r = 1,0 \dots 4,0$ мм в зависимости от D .

Значения радиуса радиальных отверстий в функции диаметра режущей поверхности дискретного шлифовального круга

D , мм	250	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
r , мм	1,85	2,00	2,30	2,50	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00

9. Определяем осевой шаг радиальных отверстий в соответствии с выражением⁷

$$3r < T_{oc} < 4r. \quad (3)$$

10. Вычисляем окружной шаг радиальных отверстий

$$T_o = 7,31r. \quad (4)$$

⁷ Пат. 2385216 Рос. Федерация; Пат. 2520169 Рос. Федерация.

11. Вычисляем число радиальных отверстий, расположенных по окружности режущей поверхности

$$n_o = \pi D / T_o. \quad (5)$$

12. Определяем число радиальных отверстий, расположенных по образующей цилиндрической режущей поверхности в длинной и короткой строках соответственно:

$$n_d = \frac{B}{T_{oc}}, \quad n_k = n_d - 1. \quad (6)$$

13. Суммарное число отверстий, размещенных на всей режущей поверхности шлифовального круга, находим по формуле

$$n_{\Sigma} = n_o (n_d + n_k). \quad (7)$$

14. Вычисляем приведенную протяженность участка, прерывающего процесс резания, по формуле

$$a_{пр} = \frac{\pi r^2 (n_k + n_d)}{B}. \quad (8)$$

15. Вычисляем приведенную окружную протяженность режущего участка дискретной поверхности шлифовального круга по формуле

$$b_{пр} = T_o - \frac{\pi r^2 (n_k + n_d)}{B}. \quad (9)$$

16. Абсолютный износ алмазного инструмента за один проход правки шлифовального круга, режущая поверхность которого подвергнута дискретизации с использованием высококонцентрированного потока энергии (лазерным лучом или гидроабразивной струей высокого давления), вычисляем по формуле

$$u_d = \sum_{i=1}^p \left[\frac{u_{oi} \pi DB}{10^6 v_{si} T_o} (T_o - a_{пр}) \right] = \sum_{i=2}^p \left[\frac{u_{oi} \pi DB}{10^6 v_{si} T_o} \left(T_o - \frac{\pi r^2 (n_k + n_d)}{B} \right) \right], \quad (10)$$

где u_{oi} – относительный износ правящего инструмента, вычисленный по формуле (1) при конкретной глубине резания на рассматриваемом проходе правки; $v_{si} = v_s / n$ – скорость продольной подачи правящего инструмента на рассматриваемом проходе, мм/об., v_s – скорость продольной

подачи правящего инструмента на рассматриваемом проходе, мм/мин; i – номер рассматриваемого прохода правки; p – общее число проходов, выполненных в течение одного цикла правки шлифовального круга.

Каждая правка шлифовального круга содержит несколько рабочих проходов алмазного инструмента, при этом черновые проходы выполняются при большей глубине резания, а чистовые – при меньшей. Например, при правке дискретных шлифовальных кругов выполняют в большинстве случаев два черновых прохода алмазного инструмента при глубине резания $t = 0,01$ мм и один чистовой проход при $t = 0,005$ мм.

Исходя из этого перед использованием выражения (10) необходимо предварительно определить относительный износ алмазного инструмента по уравнению (1). При глубине $t = 0,01$ мм и $t = 0,005$ мм значения относительного износа соответственно равны: после первого и второго черновых проходов алмазного карандаша $u_{o1} = u_{o2} = 0,98$ мкм/км, а после третьего чистового прохода $u_{o3} = 0,79$ мкм/км. Полученные значения относительного износа вводят в уравнение (10), и вычисляется абсолютное значение износа алмазного инструмента после одного цикла правки шлифовального круга.

Стандартные шлифовальные круги со сплошной режущей поверхностью подвергаются более быстрому засаливанию режущей поверхности, при этом отходы шлифования более глубоко проникают в поры инструмента, это объясняется тем, что снятой с заготовки стружке некуда деваться и она размазывается по режущей поверхности. Такого явления при шлифовании дискретных шлифовальных кругов не наблюдается, либо оно протекает в значительно меньшей степени ввиду частичного размещения отходов шлифования в радиальных отверстиях или на других участках, прерывающих процесс резания.

По этой причине правка шлифовальных кругов со сплошной режущей поверхностью в большинстве случаев проводится за два черновых прохода алмазного инструмента с глубиной резания $t = 0,015 \dots 0,020$ мм и один-два чистовых прохода при $t = 0,005 \dots 0,010$ мм [2].

17. С учетом глубины резания и числа проходов правки шлифовального круга вычисляют толщину абразивного слоя, снятого за один цикл правки по формуле

$$z_1 = \sum_{j=1}^p t_j, \quad (11)$$

где t_j – глубина резания на каждом из проходов правки.

18. Определяем общее число циклов правки за весь период эксплуатации шлифовального круга

$$n_{\text{ц}} = \frac{D_i - d_i}{2z_1}, \quad (12)$$

где D_i, d_i – соответственно диаметр режущей поверхности шлифовального круга до и после каждого цикла правки.

Проведенные эксперименты показали, что в каждом цикле правки сплошного шлифовального круга содержится большее число проходов алмазного инструмента, при этом снятие засаленного слоя осуществляется при большей глубине резания. По этим причинам за один цикл правки с режущей поверхности сплошного шлифовального круга снимается большая толщина абразивного слоя, что сокращает ресурс его работы по сравнению с дискретными шлифовальными кругами.

Правка дискретных шлифовальных кругов происходит при меньших глубинах резания, что приводит в соответствии с выражением (1) к снижению относительного износа, а следовательно, уменьшению абсолютного износа алмазного инструмента.

Кроме того, в правой части выражения (10) указаны следующие факторы: размеры режущей поверхности шлифовального круга (πDB), число отверстий (n_k, n_d), радиус вырезанных радиальных отверстий (r) и скорость продольной подачи алмазного карандаша (v_{s1}). Варьированием этих факторов также можно управлять износом алмазного инструмента при правках шлифовальных кругов с дискретной режущей поверхностью.

На основании разработанной методики можно рассчитать и сравнить абсолютный износ алмазного инструмента при правках шлифовальных кругов с различными способами и схемами дискретизации режущей поверхности и выбрать шлифовальный инструмент, обеспечивающий минимальные затраты на выполнение технологической операции шлифования конкретного изделия.

Приведенные результаты исследований получены при поддержке Гранта РФФИ-2011 (проект № 11-08-97542 p_центр_a).

Список литературы

1. Гусев В.Г., Морозов В.В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Г. Гусева. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с.

2. Гусев В.Г., Морозов А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с.

3. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Прогрессивные инструменты современного машиностроения // Прогрессивные инструменты и технологии шлифования: монография / Д.В. Ардашев, Ю.В. Василенко, В.Г. Гусев [и др.]. – М.: Спектр, 2013. – С. 39–110.

4. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics // Russian Engineering Research. – 2009. – № 29(8). – P. 835–837.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel // Russian Engineering Research. – 2009. – № 29(9). – P. 940–943.

6. Морозов А.В., Климов А.А. Формирование заборной режущей поверхности шлифовального круга с лазерной дискретизацией // Молодежь и наука: реальность и будущее: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Невинномысск: Изд-во Невинномысск. ин-та экономики, управления и права, 2010. – Т. 5. – С. 567–568.

7. Гусев В.Г., Морозов А.В., Швагирев П.С. Дискретизация режущей поверхности шлифовальных кругов, работающих периферией // Повышение качества продукции и эффективности производства: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Вестник КГУ. – 2006. – № 1. – С. 143–145.

8. Морозов А.В., Алешин М.П. Лазерное излучение – прогрессивный способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента // 40-е Гагаринские чтения: сб. науч. ст. междунар. молодеж. науч. конф. – М.: Изд-во МАТИ, 2014.

9. Морозов А.В., Алешин М.П. Новое направление применения гидроабразивной струи жидкости высокого давления // 40-е Гагаринские чтения: сб. науч. ст. междунар. молодеж. науч. конф. – М.: Изд-во МАТИ, 2014.

10. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 930 с.

References

1. Gusev V.G., Morozov V.V. Tekhnologiya ploskogo diskretnogo shlifovaniia [Technology digital flat grinding]. Vladimirskii gosudarstvennyi universitet, 2007. 344 p.

2. Gusev V.G., Morozov A.V. Ploskoe periferiinoe shlifovanie diskretnymi krugami [Flat discrete peripheral grinding circles]. Ioshkar-Ola: Kollokvium, 2012. 222 p.

3. Gusev V.G. Morozov A.V., Shvagirev P.S. Progressivnye instrumenty sovremennogo mashinostroeniia [Advanced tools of modern engineering]. *Ardashev D.V., Vasilenko Iu.V., Gusev V.G. [et al.]. Progressivnye instrumenty i tekhnologii shlifovaniia*. Moscow: Spektr, 2013. 320 p.

4. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics. *Russian Engineering Research*, 2009, no. 29(8), pp. 835-837.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Discrete structure of the cutting surface of a grinding wheel. *Russian Engineering Research*, 2009, no. 29(9), pp. 940-943.

6. Morozov A.V., Klimov A.A. Formirovanie zabornoj rezhushchei poverkhnosti shlifoval'nogo kruga s lazernoj diskretizatsiei [The fence forming the cutting surface of the grinding wheel with laser sampling]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Molodezh' i nauka: real'nost' i budushchee"*. Nevinnomysskii institut ekonomiki, upravleniia i prava, 2010, vol. 5, pp. 567-568.

7. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Diskretizatsiia rezhushchei poverkhnosti shlifoval'nykh krugov, rabotaiushchikh periferiei [The discretization of the cutting surface of grinding wheels, working periphery]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Povyshenie kachestva produktsii i effektivnosti proizvodstva. Vestnik KGU*, 2006, no. 1, pp. 143-145.

8. Morozov A.V., Aleshin M.P. Lazernoie izluchenie – progressivnyi sposob diskretizatsii rezhushchei poverkhnosti shlifoval'nogo instrumenta [Laser radiation – progressive way of sampling the cutting surface of the grinding tool]. *Sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "40-e Gagarinskie chteniia"*. Moskovskii aviatsionnyi tekhnologicheskii institut, 2014.

9. Morozov A.V., Aleshin M.P. Novoe napravlenie primeneniia gidroabrazivnoi strui zhidkosti vysokogo davleniia [The new direction of the

application of the waterjet high pressure liquid jet]. *Sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "40-e Gagarinskie chteniia"*. Moskovskii aviatsionnyi tekhnologicheskii institut, 2014.

10. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia* [Directory technologist-machinist]. Moscow: Mashinostroenie, 2003. Vol. 2. 930 p.

Получено 28.10.2015

Об авторе

Морозов Алексей Валентинович (Владимир, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: ntk_2005@rambler.ru.

About the author

Aleksei V. Morozov (Vladimir, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Mechanical Engineering Technology”, Vladimir State University named under A.G. and N.G. Stoletovyh; e-mail: ntk_2005@rambler.ru.