

УДК 621.924

А.Е. Проволоцкий, Можеб Мохаммад

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ
СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С ГИДРОАБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

Аннотация. При шлифовании кругами из СТМ (синтетического сверхтвёрдого материала) определено, что на основе правильного выбора оптимальных режимов шлифования, с учётом оптимальных значений величины линейного износа зерна и с применением гидроабразивной струи можно повысить производительность, стойкость шлифовального круга и образовать матовый микрорельеф на обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова. Режимы шлифования, износ, гидроабразивная струя, производительность, эльбор, прижог.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.

Широкое освоение промышленностью производства синтетических алмазов и других сверхтвёрдых материалов стало одним из основных факторов ускорения научно-технического прогресса в машиностроении. В настоящее время невозможно представить развитие какой-либо отрасли без применения инструментов из синтетических сверхтвёрдых материалов. Благодаря своим непревзойденным физико-механическим и режущим характеристикам абразивные инструменты из синтетических сверхтвёрдых материалов (СТМ) успешно используются при обработке разнообразных материалов, начиная с пластичной меди и заканчивая самым прочным из встречающихся в природе материалов – алмазом, обработка которого обычным абразивным инструментом весьма затруднена. Особенно эффективно применение инструментов из СТМ при шлифовании таких труднообрабатываемых материалов, как твердые сплавы и высокопрочные стали, износостойкие наплавки и различные жаропрочные, конструкционные материалы, которые

© Проволоцкий А.Е., Можеб Мохаммад, 2009

широко используются в инструментальном производстве и горнорудной промышленности, металлургии и других отраслях.

Традиционно основным потребителем шлифовальных кругов из СТМ в металлообработке является инструментальное производство, требующее высококачественной обработки твердосплавных, быстрорежущих и алмазных однолезвийных и многолезвийных инструментов на операциях круглого наружного и внутреннего, плоского шлифования, а также на операциях заточки инструментов.

Исследованиями многих авторов [1, 2, 3, 4, 5] установлена четкая взаимосвязь работоспособности лезвийных режущих инструментов с методами их обработки на операциях заточки и шлифования. Применение обычных абразивных кругов, как правило, не обеспечивает требуемого качества изготовления таких инструментов. Возникающие в процессе шлифования на обрабатываемых поверхностях различные дефекты (прижоги, микросколы, трещины и т.д.) не всегда удается исправить последующей чистовой алмазной или эльборовской обработкой, что приводит к значительному браку инструмента и снижению его работоспособности при эксплуатации.

Указанных недостатков лишена обработка алмазными кругами или кругами из других СТМ. Замена на операциях шлифования абразивных кругов на алмазные или эльборовые позволяет до 1,5-2-х раз увеличить работоспособность инструмента, устранить брак по трещинам, сколам и выкрашиваниям режущих кромок, прижогам и другим структурным дефектам, присущим традиционным, пока еще широко применяемым на практике методам абразивной обработки. Такая эффективность обработки инструментов кругами из СТМ достигается за счет значительного снижения сил и температуры резания, повышения стойкости и надежности работы круга. Вместе с тем, несмотря на отмеченные преимущества, круги из СТМ эффективно применимы в основном при чистовом шлифовании и доводке, т.е. при съеме относительно небольших припусков. Использование кругов из СТМ в условиях предварительного шлифования, как правило, экономически нецелесообразно. Это обусловлено тем, что в современной металлообрабатывающей промышленности достигнут весьма высокий уровень производительности абразивного шлифования. Абразивный круг,

работая в режиме интенсивного износа и самозатачивания, особенно на операциях круглого наружного и плоского шлифования, позволяет реализовать производительность обработки в 2-10 раз и более превышающую соответствующую производительность шлифования кругами из СТМ. Такое соотношение интенсивностей съема материала получено из условия одинаковой себестоимости обработки. При ужесточении режимов алмазного шлифования наблюдается интенсивный рост износа круга, и ведение процесса в таких условиях становится неэффективным.

Основная часть. Теоретический подход к оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ с гидроабразивной обработкой.

Проведенный в предыдущей части анализ опубликованных работ показал, что существующие процессы шлифования кругами из СТМ (включая многопроходное и глубинное шлифование) не могут быть эффективно использованы при съеме значительных припусков вследствие относительно низкой производительности обработки. Установлено, что основным фактором, сдерживающим повышение производительности обработки, является высокий уровень износа круга из СТМ, обусловленный преждевременным объемным разрушением и выпадением из связки круга практически изношенных зерен от действия чрезмерных механических нагрузок. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины, Харьковском политехническом институте, Одесском политехническом институте и т.д. Согласно этим данным, с увеличением производительности обработки число зерен с площадками износа значительно уменьшается (т.е. уменьшается параметр x), а число выпавших из связки круга малоизношенных зерен – резко увеличивается, достигая значений 70...80%, что приводит к весьма интенсивному увеличению удельного расхода алмаза. Противоположное влияние параметра x на производительность обработки и удельный расход алмаза указывает на существование экстремального (оптимального) значения этого параметра, определяющего максимально возможную производительность обработки при экономически приемлемом расходе алмазов. При этом уровень максимально возможной

производительности обработки зависит от параметра P , определяемого прочностью зерен и связки круга. С увеличением P производительность обработки увеличивается.

Таким образом показано, что добиться повышения производительности обработки можно за счет применения оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, полученных с учетом оптимальных значений физических параметров x и P , которые в свою очередь должны быть установлены с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и технических ограничений обработки: экономически приемлемым износом круга из СТМ или минимальной себестоимости, параметрами качества и точности обрабатываемых поверхностей.

На основе указанного, первая теоретическая предпосылка может быть сформулирована так: выбор оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ должен производиться с учетом оптимальных значений величины линейного износа зерен до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно.

Для реализации на практике установленных таким образом оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ оптимальные значения параметров x и P должны в процессе шлифования поддерживаться постоянными. Для этого могут быть использованы условия работы круга в режиме самозатачивания. Однако реализовать режим самозатачивания для кругов из СТМ на высокопрочных металлических связках весьма сложно, т.к. они интенсивно засаливаются и быстро теряют режущую способность. С созданием прогрессивных методов комбинированного шлифования кругами из СТМ, основанных на введении в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии, возможности повышения режущей способности круга значительно расширились. Эффективное электроэрозионное или электрохимическое воздействие на рабочую поверхность круга позволяет вскрыть алмазные зерна на значительную высоту, полностью исключает засаливание круга и обеспечивает управление режущим рельефом круга. Это создает объективные предпосылки для эффективного регулирования в процессе шлифования оптимальными значениями параметров x и P , независимо от прочностных свойств

металлической связки, что является необходимым условием применения на практике оптимальных режимов шлифования, в максимальной степени реализующих высокие режущие свойства кругов из СТМ.

С учетом сказанного вторая теоретическая предпосылка может быть сформулирована следующим образом: оптимальные значения величины линейного износа зерен до момента его объемного разрушения или выпадения из связки и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно, в процессе шлифования должны поддерживаться постоянными за счет дополнительного электрофизикохимического воздействия на рабочую поверхность круга или осуществление работы круга в режиме самозатачивания, реализуя таким образом оптимальные режимы шлифования.

Таким образом, первая и вторая теоретические предпосылки определяют условия достижения максимально возможной производительности обработки и реализующих ее режимов шлифования, однако не определяют методику их расчета. Поэтому, последующие теоретические предпосылки будут направлены на решение этой задачи, для чего необходимо провести анализ основных теоретических подходов к расчету физических и технологических параметров процесса шлифования.

Длительное время в теории шлифования преобладал макроскопический подход к расчету основных параметров обработки, рассматривающей зону резания в виде «пятна» контакта круга с заготовкой, в пределах которого режущие зерна в одинаковой степени участвуют в съеме материала. Родоначальником такого подхода по праву является проф. Маслов Е.Н., который в своих работах [6, 7-9] впервые в системном виде предложил расчетные зависимости для определения средней толщины среза отдельным зерном, количество одновременно работающих зерен, длины среза и других параметров для различных кинематических схем шлифования. Несмотря на весьма упрощенный подход к расчету параметров шлифования и значительное расхождение экспериментальных и расчетных данных, предложенные проф. Масловым Е.Н. расчетные зависимости не утратили своей значимости и в настоящее время широко используются для анализа и оптимизации процесса шлифования, но гидроабразивная обработка не производилась.

Таким образом, третья теоретическая предпосылка может быть сформулирована так: переменность углов входа условных элементарных слоев снимаемого припуска в рабочую поверхность круга вдоль дуги контакта круга с заготовкой и вероятностный характер участия зерен в резании должны сформировать сложную по конфигурации границу завершения диспергирования режущими зернами подводимого в зону резания обрабатываемого материала, определяющей положение условной поверхности резания и являющейся основой для расчета, оптимизации и управления процессом шлифования с гидроабразивной обработкой.

Исходя из этого, предпосылка может быть сформулирована так: вполне однозначное математическое представление процесса шлифования положением условной поверхности резания должно предопределить существование замкнутой системы уравнений, с единых позиций описывающих основные физические и технологические параметры шлифования во взаимосвязи с режимом шлифования, характеристиками круга и заготовки, включая величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или преждевременного выпадения из связки круга без разрушения и величину предельной нагрузки, действующей на отдельное звено круга.

Для вероятностного описания участия зерен в резании введена новая вероятностная функция – относительная полнота профиля круга $\varepsilon(y)$, которая по структуре построения аналогична относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности и учитывает перекрытие проекции зерен на радиально движущийся обрабатываемый образец.

Снимаемый припуск в расчетной схеме представлен пакетом бесконечно тонких цилиндрических оболочек, которые под разными углами входят в рабочую поверхность круга.

В результате взаимодействия оболочек с зернами, с каждой оболочки происходит срезание металла, описываемое функцией $\varepsilon_n(y)$:

$$\varepsilon_n(y) = 1 - \exp \left\{ - \frac{\sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V_{заг} \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \left[\frac{y^3}{2 \cdot \sqrt{t_{нГ}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} \right] \right\} + Г.А.О. \quad (1)$$

где k – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м²; b –

максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга, м; 2γ – угол при вершине конусообразного режущего зерна; $V_{кр}, V_{заг}$ – соответственно скорости круга и заготовки, м/с; $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{заг}}$; где $R_{кр}, R_{заг}$ – соответственно радиусы круга и заготовки, м; $t_{iT} = t_T + i \cdot t$ – координата оболочки при i -том контакте ее с кругом, м; $t_{nT} = t_T + (n-1) \cdot t$ – координата оболочки при n -ном контакте ее с кругом, м; t_T – координата текущей бесконечно тонкой оболочки, которыми условно представлен снимаемый припуск, м; n – число проходов круга.

Основу разработанной кинематической модели шлифования составляет аналитическое решение об описании границы завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, вдоль дуги контакта круга с заготовкой:

$$H = \sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[6]{t_{nT}} \cdot \sqrt[3]{\frac{H_{max}^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT_{экстр}}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT_{экстр}}^{5/2} - \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} + \Gamma.A.O.}, \quad (2)$$

где H_{max} – максимальная толщина среза, м; $t_{nT_{экстр}}$ – координата экстремального положения оболочки, у которой полный профиль $\varepsilon(y) = 0,95$ образуется на уровне H_{max} , м; $t_{iT_{экстр}}$ – координата экстремального положения оболочки при i -том контакте ее с кругом, м.

Граница проведена по вершинам микронеровностей обрабатываемого материала, имеет сложную конфигурацию, соединяет обрабатываемую поверхность с обработанной и по аналогии с лезвийной обработкой определяет положение условной вероятностной поверхности резания при шлифовании. Характерные точки границы являются основой для расчета физических и технологических параметров шлифования (максимальной толщины среза, шероховатости обработанной поверхности, фактической длины контакта круга с заготовкой и т.д.). Это позволяет с единых позиций вполне однозначно аналитически описать закономерности процесса шлифования во всем возможном диапазоне изменения глубины шлифования (включая диапазоны многопроходного и глубинного шлифования).

Расчетами установлено, что положение границы определяется соотношением двух параметров – максимальной (приведенной вероятностной) толщины среза H_{max} и глубины шлифования t . В случае $t < H_{max}$ (многопроходное шлифование) граница принимает примерно симметричную форму относительно осевой плоскости шлифования, в случае $t > H_{max}$ (глубинное шлифование) – ассиметричную форму.

Расчетами установлено, что процент работающих зерен для случая $t > H_{max}$ составляет приблизительно 50%, а для случая $t < H_{max}$ – 5...10% (т.е. зерна проходят почти «след в след», что, как будет показано выше, является важным фактором увеличения производительности обработки).

В случае $t > H_{max}$ аналитическая зависимость для определения границы принимает простой вид:

$$H = H_{max} \cdot \sqrt[6]{\frac{t_T}{t}}, \quad (3)$$

где t_T – координата текущей элементарной (бесконечно тонкой) цилиндрической оболочки, которыми условно представлен в расчетной схеме снимаемый припуск, м.

Соответственно, параметры границы H_{max} и R_{max} (параметр шероховатости обработки, м) описываются аналитическими зависимостями

$$H_{max} = \left(\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,33} + Г.А.О., \quad (4)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,4} - Г.А.О., \quad (5)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация; $V_{заг}$, $V_{кр}$ – соответственно скорости заготовки и круга, м/с;

$$\rho = \frac{1}{R_{заг}} + \frac{1}{R_{кр}},$$

где $R_{кр}$, $R_{заг}$ - соответственно радиусы круга и заготовки, м;

Полученные результаты уточнены в рамках разработанной физической модели шлифования. Установлены расчетные зависимости, которые содержат новый безразмерный параметр $\eta = \frac{x}{H}$, определяющий степень линейного износа зерен и изменяющийся в пределах 0...1 (для «острого» зерна $\eta \rightarrow 0$, для затупившегося $\eta \rightarrow 1$):

$$H_{max} = \left[\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0.5} \cdot \rho^{0.5} \cdot (1-\eta)^2}{m \cdot V_{кр} \cdot (1+\eta)} \right]^{0,33} + Г.А.О. \quad (6)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left[\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} \cdot \frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right]^{0,4} - Г.А.О. \quad (7)$$

С учетом параметра η ($\eta > 0$) значения H_{max} и R_{max} уменьшаются. Следовательно, уменьшается (и даже устраняется) расхождение между расчетными и экспериментальными значениями H_{max} .

Из этого следует, что учет величины линейного износа зерна x (посредством параметра η) в расчетных зависимостях позволяет привести в соответствие теорию и практику шлифования.

Из всех входящих в зависимости параметров (6, 7), наибольшее влияние на H_{max} и R_{max} оказывает η . Это указывает на преобладающую роль величины η в формировании основных физических и технологических параметров шлифования и подтверждает выдвинутую гипотезу об эффективности управления процессом шлифования на основе регулирования величины η .

Проведенный анализ известных методов алмазного и абразивного шлифования показал, что все они, как правило, реализуют условие $t = H_{max}$, т.е. минимум производительности обработки Q . Очевидно, для абразивного шлифования это эффективно, т.к. за счет действия на зерна больших нагрузок обеспечивается режим интенсивного самозатачивания круга и поддерживается его высокая режущая способность. Для алмазного шлифования это условие приводит к повышенному износу круга, что,

собственно, и предопределяет низкую эффективность применения алмазных кругов при высокопроизводительном шлифовании и нецелесообразности их использования взамен обычных абразивных кругов при съеме больших припусков.

Полученная экстремальная зависимость $Q-t$ определяет кинематические условия существенного повышения производительности обработки, состоящие в реализации новых соотношений между параметрами t и H_{max} ($t < H_{max}$, $t > H_{max}$), т.е. в реализации левой и правой ветвей зависимости.

На этой основе разработаны новые способы шлифования, реализующие левую ветвь зависимости $Q - t$. Они базируются на применении схем многопроходного и глубинного круглого наружного шлифования с относительно большой скоростью заготовки, близкой к скорости круга; схем глубинного круглого наружного шлифования периферией круга с относительно небольшой скоростью заготовки и большой продольной подачей; схем глубинного круглого наружного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и дополнительными тангенциальными высокочастотными движениями круга большой амплитуды; схем глубинного плоского торцового шлифования с использованием дополнительных высокочастотных колебательных движений круга или заготовки в направлении, перпендикулярном направлению подачи круга.

Установлено, что эффективность шлифования в данном случае обусловлена прохождением зерен почти «след в след» и возможностью увеличения H_{max} при фиксированном значении S (т.е. нагрузки, действующей на зерно), что позволяет обработку вести с большой скоростью круга $V_{кр}$ до 600 м/с и выше. Применение таких условий обеспечит увеличение производительности обработки в 10 раз и более, что хорошо согласуется с опытом зарубежных станкостроительных фирм, которые вышли на создание шлифовальных станков со скоростью круга до 300 м/с.

Реализация предложенных схем шлифования требует создания новых станков, обеспечивающих большие скорости круга и заготовки. Это позволит кардинально изменить содержание шлифовальных операций с гидроабразивной обработкой.

Дальнейшее изучение гидроабразивной обработки узкими щелевыми струями позволит создать новые технологические схемы формообразования поверхностей деталей из различных материалов.

В технологических расчетах необходимо знать величину линейного съема материала за некоторый промежуток времени. Процесс гидроабразивной обработки можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = K_1(Q - x), \quad (8)$$

где Q – общий линейный припуск, который необходимо снять струей; x – текущий съем за время воздействия струи на всю обрабатываемую поверхность; K_1 - коэффициент разрушения.

Выводы. С использованием такой технологии проведено много экспериментальных исследований. Шлифовальный круг очищается гидроабразивной струей от снятых металлов заготовок. На обработанных деталях образуется матовая шероховатость и меньше, чем при обычном шлифовании. Перспектива такой технологии – внедрение при обработке деталей, износостойкость которых повышается.

По таким научным и технологическим планам разработано несколько технологий для обработки разных деталей и повышения срока эксплуатации шлифовальных кругов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Внуков Ю.Н. Исследование процесса высокопроизводительного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых сверхтвердых поликристаллов. – Автореф. ...канд. техн. наук, - Тбилиси, 1977. – 21 с.
2. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.
3. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техніка, 1980. – 212 с.
4. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Зубкова М.Я., Раб А.Ф., Воронков В.И., Эльборовое шлифование быстрорежущих сталей. – Харьков: Вища школа, 1974. – 136 с.
5. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Сизый Ю.А., Пивоваров М.С. Работоспособность алмазных кругов. – К.: Техніка, 1983. – 95 с.

6. Маслов Е.Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании.
– В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования.
– М.: Машгиз, 1960. – 196 с.
7. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса алмазного шлифования материалов. – В кн.: Синтетические алмазы в промышленности. – К.: Наук. Думка, 1974. – С. 125-129.
8. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
9. Маслов Е.Н., Попов С.А. Абразивная обработка металлов. – В кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 335-378.