

ного отбора и генетики. Генетические алгоритмы – это методы случайного глобального поиска, копирующие механизмы естественной биологической эволюции. ГА оперируют с популяцией оценок потенциальных решений (индивидуумов), генерируя по принципу «выживает наиболее приспособленный» все более близкие к оптимальному решения. Процесс такой последовательной генерации приводит к эволюции популяций индивидуумов, которые лучше соответствуют окружающей среде по сравнению с предыдущими.

Таким образом, системный подход позволяет моделировать и управлять производственным технологическим процессом, представленным в виде отдельных блоков, что существенно упрощает описание сложных явлений, не упуская из вида пространственно-временную структуру моделируемой системы, характер связи между отдельными уровнями и подсистемами. При исследовании и разработке технических систем, включая сложные производственно-технологические системы, следует обеспечить на этапе синтеза заданные характеристики устойчивости и качества процессов управления, на этапе моделирования заданные либо достижимые показатели точности управляемых параметров.

В результате, рекомендовано при структурном анализе процесса комбинированной обработки, для детализации на SADT– диаграмме технологической операции, разделять группы наиболее значимых параметров качества, а по результатам статистического анализа моделей, полученных многофакторным планированием экспериментов, выделять для управления параметрами наиболее влиятельные и наименее коррелированные с другими технологические факторы.

*Дитиненко С. А., Новиков Ф. В.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, г. Харьков, Украина

## **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

Опыт применения алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов на основе карбида вольфрама свидетельствует о том, что алмазный круг претерпевает достаточно быстрый износ и потерю режущих свойств. Первоначально достаточно высокая производительность процесса к концу периода стойкости инструмента резко понижается из-за интенсивного засаливания круга. Стойкость круга составляет 6 ... 15 минут. Для восстановления режущих свойств алмазного круга возникает необходимость в его правке. Такой интенсивный износ круга в основном объясняется высокой твердостью обрабатываемого материала: микротвердость WC составляет 15850 – 17300 Н/мм<sup>2</sup>.

Основной эксплуатационной характеристикой качества рабочих поверхностей алмазных инструментов является их режущая способность. Сохранение этих свойств в течение длительного периода времени находится в прямой зависимости от применяемого метода шлифования, позволяющего в той или иной степени поддерживать высокую развитость рельефа алмазного круга, исключать его засаливание в процессе работы и обеспечивать необходимое выступание режущих зерен над связкой алмазного круга.

Опыты многих исследователей [1] показывают, что алмазные круги после электроэрозионной правки обладают высокими режущими свойствами, которые существенно превышают режущие свойства, получаемые после других видов правки – абразивной, катодной и пр. Они довольно долго сохраняют режущую способность, хотя в начальный период приработки наблюдается некоторое снижение производительности. При этом имеет место повышенный расход алмазов вследствие вырывания наиболее выступающих слабо закрепленных зерен. Если работа производится в режиме алмазно-искрового шлифования, то режущая способность круга стабильно сохраняется в течение длительного времени (несколько часов). В результате электроискрового воздействия существенно повышается режущая способность кругов, что приводит к снижению напряженного состояния обрабатываемой поверхности. Так, в результате шлифования сплавов ВК8 алмазными кругами одинаковой зернистости, но с различным способом правки круга (абразивная, электроэрозионная), наблюдается формирование в карбидной фазе сжимающих остаточных напряжений, обнаружена тенденция к их возрастанию в 2 раза при шлифовании кругами, правленными электроэрозионным способом (режим механической обработки образцов –  $V_{кр} = 30$  м/с,  $S = 1$  м/мин, режим электроэрозионной правки кругов при помощи генератора импульсов –  $f = 8$  кГц,  $W = 0,009$  Дж) [2].

Сжимающий характер остаточных напряжений указывает на существенное значение силового фактора в формировании напряженного состояния обрабатываемой поверхности в обоих случаях правки и меньшим тепловыделением вследствие лучшей микрогеометрии алмазных зерен и большего выступления их над связкой в случае шлифования кругами, подвергнутыми правке электроэрозионным способом. Процесс алмазно-искрового шлифования (АИШ) основан на совмещении в зоне обработки механического резания и электроискрового воздействия.

Исследование качества поверхности труднообрабатываемых сплавов после АИШ представляет практический интерес. Твердые сплавы на основе WC имеют относительно низкую прочность на изгиб. Как известно, твердость карбида вольфрама очень высокая, но в то же время он очень хрупкий. При АИШ высокотемпературный и высокоскоростной локальный нагрев приводит к существенным изменениям в условиях работы алмазных зерен и, следовательно, может влиять на фазовый состав, микроструктуру и напряженное состояние обработанной поверхности. Одновременно с этим происходит электроискровое воздействие на материал инструмента и его правка, что в свою очередь отражается на параметрах состояния поверхностного слоя.

На процесс формирования обработанной поверхности при АИШ оказывают влияние в основном электрические параметры обработки: сила тока, напряжение. С увеличением силы тока (от 10 до 60 А) высота микронеровностей несколько уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением силы тока повышается интенсивность электрохимических процессов, что уменьшает долю механического съема.

Некоторое уменьшение микротвердости при электрохимическом алмазном шлифовании можно объяснить меньшими силовыми воздействиями на обрабатываемую деталь вследствие преимущественного растворения кобальтовой связи [2]. В связи с этим важно оценить параметры качества обработки крупнозернистых и мелкозернистых твердых сплавов на основе карбида вольфрама после алмазно-искрового и обычного алмазного шлифования кругами формы 12А1 и 1А1 на металлической связке М1-01 [3].

Первоначально проводились исследования процесса алмазного шлифования кругом 12А1 45° 150×10×3×32 АС6 125/100 М1-01 4 (с применением электроэрозионной правки) торца кольца, выполненного из композиции "твердый сплав "Релит" – медь". Твердый сплав релит – это зерна литого карбида вольфрама размером 0,18 ... 0,28 мм, твердостью 21000 ... 28000 Н/мм<sup>2</sup>. Композиция "твердый сплав "Релит" – медь" получена методом прессования с удельным давлением 3 ... 4 т/см<sup>2</sup> и последующим спеканием в вакуумной печи при температуре 1150 ... 1200 °С.

Структура сплава "Релит" представляет собой вольфрамовый каркас, поры которого заполнены медью (рис. 1,а). Медь и вольфрам практически не растворяются один в другом ни в жидком, ни в твердом состоянии. Твердые сплавы на основе WC имеют простую кристаллическую решетку, которая не распадается при нагреве и отличается высокой прочностью. Особенностью данного сплава является то, что размер зерна WC составляет 0,2 мм и выше, что затрудняет процесс шлифования.

Шлифование торца вращающегося кольца торцом алмазного круга производилось на внутришлифовальном станке. Кольцо устанавливалось в патроне. Круг устанавливался на шпинделе станка и прижимался к торцу кольца. Скорость подачи круга в радиальном направлении составляла 1,5 мм/мин, скорость вращения круга – 30 м/сек, скорость вращения кольца – 60 м/мин, СОЖ – 3 %-й раствор Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>. Электроэрозионная правка алмазного круга производилась с использованием источника постоянного тока мощностью до 2-х кВт.

Для определения фазового состава проводились рентгеновские съемки поверхностного и предповерхностного слоя (около 5 мкм от поверхности) прошлифованного образца на дифрактометре Дрон-2,0 в излучении хромового анода. Дифрактограммы записывались автоматически при непрерывном вращении образца и счетчика. На дифрактограммах поверхностного и предповерхностного слоя выявляются линии только WC и Cu. Линии достаточно сильные и идентифицируются уверенно. Интенсивность дифракционных линий поверхностного слоя меньше, чем предповерхностного, что объясняется различной чистотой поверхности.

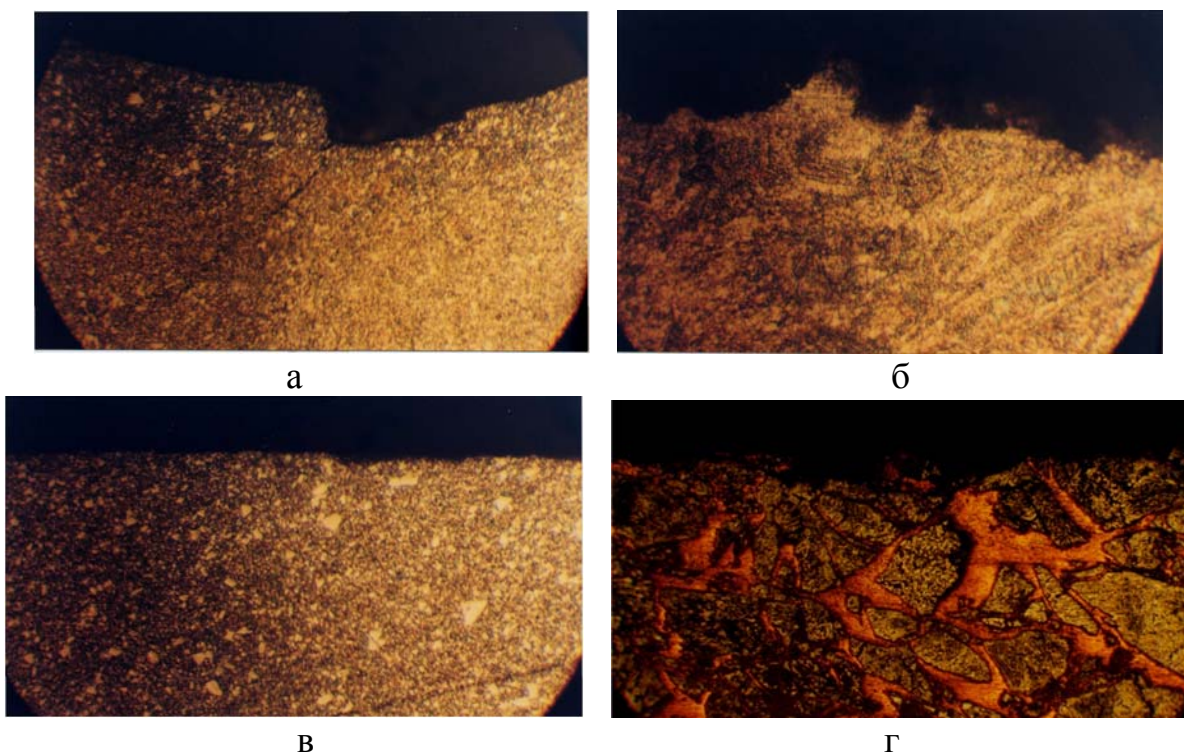


Рисунок 1 – Микроструктура твердых сплавов на основе карбида вольфрама

Металлографический анализ выявляет наличие микролунок (рис. 1,а). Под действием электрического разряда происходит быстрый высокотемпературный локальный нагрев поверхности электродов с образованием микролунок за счет плавления, кипения, испарения металла. Глубина лунок на поверхности нашего образца в среднем равна 4 мкм.

Измерение микротвердости  $H$  поверхностного и предповерхностного слоя образца при нагрузке 100 г выявили наличие упрочнения в поверхностном слое:  $H = 12268$  Н/мм<sup>2</sup>, а в приповерхностном слое  $H = 10623$  Н/мм<sup>2</sup>. Опыты многих исследователей показали, что существует оптимальная микротвердость поверхностных слоев трущихся деталей. Для повышения износоустойчивости деталей машин необходимо создавать в процессе АИШ микротвердость поверхностных слоев трения, равную или несколько большую оптимальной для данных условий трения поверхностей. Задача будущих исследований – определить оптимальную величину микротвердости для сплава "Релит" после АИШ для заданных условий трения.

Остаточные ориентированные напряжения  $\sigma$  определялись рентгенографическим методом многократных наклонных съемок ("sin<sup>2</sup> $\Psi$ -метод) на дифрактометре Дрон-1 в излучениях хромового анода. Регистрация профилей дифракционных линий проводилась по точкам – способом набора заданного числа импульсов.

Расчет напряжений в поверхностном слое сплава показал наличие растягивающих напряжений в карбидной фазе:  $\sigma = +244,3$  Н/мм<sup>2</sup>; напряжения в медной составляющей сплава равны нулю.

На основании приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы:

1. Электрические разряды выполняют вспомогательную роль, их действие способствует интенсификации основного процесса шлифования, а именно поддержанию высокой режущей способности алмазного круга.

2. Исследование показателей качества поверхностного слоя сплава выявили оптимальные значения с точки зрения износостойкости, а именно: отсутствие фазовых превращений; отсутствие микротрещин; наличие упрочнения поверхностного слоя.

Сплав ВК8 (92 % WC и Co 8 %) относится к I группе твердых сплавов и применяется в основном для обработки чугуна, цветных металлов. Порошок WC прессуют и спекают при высокой температуре (1400 °C) с порошком кобальта, при этом кобальт является пластичной связкой для WC и сплавов, неметаллических материалов [4].

Весьма целесообразно применение резцов, оснащенных ВК8, при непрерывном точении жаропрочных сплавов (ЭИ437А, ЭИ767, ЭИ766, ЭИ787, ЭИ827), например, при обработке дисков турбин. Одновременно установлена невозможность использования твердых сплавов при непрерывном точении жаропрочных сплавов, так как уже в первые минуты работы резцов имеют место крупные сколы пластинок, после чего их дальнейшее использование становится невозможным. Наблюдения за износом резцов, оснащенных твердым сплавом при непрерывном точении сплава ЭИ437, показывают, что имеет место сваривание образующейся стружки с твердым сплавом. При срыве налипших частиц приварившейся стружки происходит отслаивание твердого сплава как по передней, так и по задней поверхностям [5].

Таким образом, резцы из твердых сплавов типа ВК8 работают в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок. Поэтому большой интерес представляют вопросы изучения влияния условий АИШ на основные характеристики качества поверхности, которые определяют поведение резцов и других деталей в процессе эксплуатации.

Качество поверхностного слоя пластинок из твердого сплава оценивается совокупностью показателей, характеризующих геометрию поверхностного слоя и его физико-механические свойства. Первая группа показателей включает характеристику макро- и микронеровностей поверхности; наличие или отсутствие микротрещин является важным показателем работоспособности инструмента, а вторая – характеристики структуры, напряженное состояние, фазовый состав и твердость [6].

Усталостная прочность является одной из основных эксплуатационных характеристик для твердосплавных инструментов. Как было установлено многочисленными наблюдениями исследователей, очаги разрушения деталей от усталости материала зарождаются на их поверхности. Поэтому усталостная прочность деталей машин в значительной степени определяется шероховатостью их поверхностей и физическим состоянием поверхностного слоя. Наличие на поверхности детали, работающей в условиях циклической и знакопеременных нагрузок, отдельных дефектов и шероховатостей способствует концентрации напряжений, величина которых может превысить предел усталости материала. В

этом случае поверхностные дефекты и обработочные риски играют роль очагов возникновения субмикроскопических нарушений сплошности материала поверхностного слоя и его разрыхления, являющихся первопричиной образования усталостных трещин.

Для исследования качества поверхности сплава ВК8 были взяты четыре образца, шлифованные на круглошлифовальном станке алмазным кругом 1А1 300×25×6 АС6 125/100 М1-01 4. Образец №1 шлифовался в режиме алмазно-искрового шлифования: сила тока  $I = 20$  А, поперечная подача  $S_{non} = 0,2$  мм/дв. ход, скорость круга  $V_{кр} = 25$  м/с, скорость вращения заготовки  $V_{вр.заг.} = 180$  об./мин, скорость движения стола  $V_{стола} = 12$  м/мин, съём материала составил 6 мм. Образец №2 после шлифования на вышеуказанном режиме подвергался выхаживанию, то есть шлифованию без подачи (в течение 3 минут) до полного исчезновения искры. Съём материала также составил 6 мм.

Образец №3 обрабатывался по режиму обычного алмазного шлифования, с теми же механическими параметрами обработки. Однако алмазный круг предварительно подвергался электроэрозионной правке. Стойкость его работы увеличилась примерно в 10 раз.

Образец №4 обработан по схеме: обычное алмазное шлифование + выхаживание (без подачи).

Весьма тонкие поверхностные слои материала после шлифования характеризуются определенными изменениями физико-механических свойств по сравнению со свойствами исходного материала. Для установления наличия фазовых превращений при различных условиях шлифования было проведено рентгеноструктурное исследование четырех образцов (пластин) из твердого сплава марки ВК8.

В результате произведенного фазового анализа было установлено наличие только двух фаз WC и Co –  $\beta$  – твердого раствора. Оценка внутренних напряжений в поверхностном слое проводилась по выше описанной методике для сплава "Релит". Показателем степени напряженного состояния в поверхностном слое является полуширина  $B$  дифракционной кривой.

Режим АИШ формирует незначительные растягивающие напряжения  $\sigma_{x1} = + 240$  Н/мм<sup>2</sup>, что можно объяснить воздействием электрических разрядов на поверхность образца. Глубина лунок около 18 мкм (рис. 1,б). Режим №2 несколько уменьшает растягивающие напряжения:  $\sigma_{x2} = + 157,4$  Н/мм<sup>2</sup>. Сжимающие напряжения выявлены в образце №3 и составляют  $\sigma_{x3} = -262,2$  Н/мм<sup>2</sup>.

Многочисленными исследованиями установлено, что при наличии в поверхностном слое сжимающих напряжений усталостная прочность изделия значительно возрастает. В рамках данного режима можно говорить об улучшении состояния поверхностного слоя. Применяемая же доводка в образце №4 изменяет знак напряжений и составляет:  $\sigma_{x4} = +195,4$  Н/мм<sup>2</sup>. Металлографические исследования образцов также показали различное состояние поверхностного слоя. Особенно необходимо выделить поверхность образца №2 (рис. 1,в), где отчетливо видны микротрещины, которые являются результатом релаксации внутренних напряжений. Такой механизм трещинообразования характерен

для хрупких и твердых материалов. Такое объяснение логично сочетается со значением внутренних напряжений данного образца (некоторое снижение растягивающих напряжений по сравнению с режимом АИШ №1). Глубина микролунок составляет 8 мкм для образца №2, глубина микролунок от электрических разрядов после АИШ равна 18 мкм. Поверхность образца №3 является оптимальной, так как на ней отсутствуют задиры, трещины (рис. 1,г). Полученные данные основных показателей качества образцов позволяют рекомендовать режим №3 для шлифования сплава ВК8.

Алмазный круг после электроэрозионной правки обеспечивает не только повышенную стойкость, но и качественный поверхностный слой, а именно: "чистую" поверхность, наличие сжимающих напряжений, оптимальную шероховатость, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность деталей, изготовленных из сплава ВК8 [7, 8].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. ... докт. техн. наук : специальность 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГТУ, 1995. – 56 с.
2. Фукс М. Я. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльбровой обработки / М. Я. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – Киев: Вища школа, 1979. – 158 с.
3. Погребной М. А. Металографічний аналіз якості обробки твердих сплавів при алмазному шліфуванні / М. А. Погребной, С. М. Шевченко, В. П. Ткаченко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : труды 7-й Междунар. научн.-техн. конф., г. Харьков, 27–28 мая 2003. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2003. – С. 103–106.
4. Кузьмин Б. А. Металлургия. Металловедение и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин, А. И. Самохоцкий, Т. Н. Кузнецова. – Москва : Высшая школа, 1977. – 176 с.
5. Криворуков В. А. Обработываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов. – Москва : Издательство машиностроительной литературы, 1961. – 245 с.
6. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 263 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк, Н. Ф. Савченко, В. Г. Шкурупий, В. И. Полянский, И. А. Рябенков, Д. Ф. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 536 с.
8. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андилахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.