

КГО лопаток [111] обеспечивает более высокие собственные частоты рабочего колеса по сравнению с ориентацией КГО [001]. Выбор основной КГО материала лопаток следует производить с учетом всех факторов для разрабатываемой конструкции.

#### Литература

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Сб. научных трудов. Под ред. д.ф.-м.н., проф. Петерни Ю.К., д.т.н. Гецова Л.Б. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82, 282-306.

*У статті представлені прогресивні режими круглого зовнішнього шліфування важкооброблюваних матеріалів, які розроблені з урахуванням критеріїв прояву адсорбційно-пластифікуючого ефекту. Обробка ВОМ різних груп на цих режимах забезпечує підвищення продуктивності, відсутність шліфувальних дефектів та формування зміцненого шару*

*Ключові слова: режими різання, кругле шліфування, важкооброблювані матеріали*

*В статье представлены прогрессивные режимы круглого наружного шлифования труднообрабатываемых материалов, разработанные с учетом критериев проявления адсорбционно-пластифицирующего эффекта. Обработка ТОМ различных групп на этих режимах обеспечивает повышение производительности, отсутствие шлифовочных дефектов и формирование упрочненного слоя*

*Ключевые слова: режимы резания, круглое шлифование, труднообрабатываемые материалы*

*The article presents the cutting condition of cylindrical grinding of hard-to-machining materials tailored to the criteria of manifestation of the adsorption-plasticizing effect. The processing hard-to-machining materials different groups in these cutting condition provide improved performance, guaranteed lack of grinding defects and the formation of the hardened layer*

*Key words: cutting condition, cylindrical grinding, hard-to-machining materials*

Современное развитие энергетического машиностроения идет по пути повышения удельных параметров рабочих процессов, что неотъемлемо связано с одной стороны с усовершенствованием конструкций энергомашин, а с другой – обуславливает применение специальных высокопрочных материалов, механическая обработка которых традиционными методами

3. Придорожный Р.П., Шереметьев А.В. Особенности влияния кристалло-графической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин // Авиационно-космическая техника и технология, 2005, №10(26). – С.55-59.
4. Воробьев Ю.С., Дьяконенко К.Ю., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. Анализ колебаний лопаток турбомашин с учетом неоднородности материала // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – №30 – С. 41-47.
5. Воробьев Ю.С., Дьяконенко К.Ю., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. Анализ локализации напряжений при колебаниях рабочих колес и охлаждаемых лопаток ГТД. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – №35 – С. 29-43.

УДК 621.923

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНО- ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Н.В. Сурду**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*  
E-mail: surdu@ipmach.kharkov.ua

**А.В. Телегин**

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник\*  
E-mail: telegin@ipmach.kharkov.ua

\*Отдел общетехнических исследований в энергетике  
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН  
Украины  
ул. Дм. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина

затруднена. Это создает необходимость применения новых технологических процессов резания и режущих инструментов. Следует также отметить, что в последние годы у машиностроительных предприятий существенно расширился доступ к широкой номенклатуре новых режущих инструментов и режущих материалов, чаще всего зарубежного производства, что способ-

ствуется расширению технологических возможностей предприятий. В то же время, новые дорогостоящие инструменты чаще всего сопровождаются технической информацией рекламного характера. Все это возлагает на технологов предприятий большой объем работ по подбору режущих инструментов, обрабатываемых материалов и режимов обработки, что не всегда возможно в условиях производства и не всегда под силу технологам и рабочим. Одним из наиболее распространенных способов обработки различных ТОМ является шлифование, поэтому разработка рациональных и универсальных режимов шлифования является весьма актуальной задачей. Именно решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Как известно [1, 2], работа резания состоит из работы упруго-пластического деформирования срезаемого и приповерхностного слоев обрабатываемого изделия и работы трения по передней и задней поверхностям режущего клина. Следовательно, уменьшения работы резания можно достигнуть за счет: снижения прочностных характеристик обрабатываемого материала; уменьшения объема деформированного слоя в приповерхностной зоне обрабатываемой поверхности; снижения коэффициента трения по передней и задней поверхностям режущего клина.

Из физических явлений, которые способствуют снижению прочностных свойств срезаемого материала, следует выделить адсорбционно-пластифицирующий (АПЭ) [3], электронно-пластический (ЭПЭ) [4, 5] и магнито-пластический эффекты (МПЭ) [6].

АПЭ проявляется практически повсеместно и оказывает значительное влияние на энергетические и силовые параметры процесса деформирования и разрушения металлов [3, 7]. В работе [8] были разработаны критериальные зависимости, выполнение которых однозначно и надежно обеспечивает условия для проявления АПЭ при любом механическом процессе, основанном на пластическом деформировании и разрушении металлов. Таких критериев два:

1. Промежуток времени  $\Delta\tau_p$  между последовательным съемом стружки с одного и того же участка обрабатываемой поверхности не должен быть меньшим, чем латентный период  $\Delta\tau_x$  времени развития АПЭ, т.е.

$$\Delta\tau_p / \Delta\tau_x \geq 1. \quad (1)$$

2. Количество атомов (молекул)  $\Omega_k$  среды, которая подводится в контактную зону к ювенильным участкам поверхности, должно быть достаточным для того, чтобы осуществилась полномасштабная адсорбция и образовался адсорбционный слой со степенью покрытия  $\theta = 1$ . Аналитически этот критерий можно представить в виде

$$\Omega_k / \Omega_{ад} \geq P, \quad (2)$$

где  $\Omega_{ад}$  – количество атомов (молекул) в адсорбционном слое,  $P \gg 1$ .

В работе [8] было также установлено, что латентный период  $\Delta\tau_x$  времени развития АПЭ имеет порядок  $10^{-2}$  с. А при традиционных режимах шлифования промежуток времени между последовательными актами съема стружки с одного и того же участка поверхности  $\Delta\tau_x$  не превышает  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с. Этого времени недостаточно для осуществления адсорбционных процессов в достаточной степени не только для проявления АПЭ, но и для образования смазывающего слоя. Таким образом, при известных режимах шли-

фования критериальные требования (1) и (2) чаще всего не выполняются.

Из анализа кинематики процесса абразивного резания материалов следует, что, для увеличения промежутка времени  $(\Delta\tau_p)_i$  взаимодействия компонентов СОТС с ювенильной поверхностью, вскрываемой режущим зерном, необходимо установить такое соотношение между скоростью круга  $V_k$  и скоростью вращения изделия  $V_d$ , при котором выполняется условие:

$$\frac{(l_p - l_k) \cdot V_d}{l_k \cdot V_k} \geq 1 \quad (3)$$

где  $l_p$  – расстояние между режущими зёрнами;

$l_k$  – длина дуги контакта;

$V_d$  – скорость вращения детали;

$V_k$  – скорость вращения круга.

Выполнение этого условия означает, что линейная скорость вращения обрабатываемой поверхности изделия устанавливается такой, что, за промежуток времени  $(\Delta\tau_p)_i$ , между выходом из зоны контакта режущего зерна и входом в зону следующего режущего зерна, находящегося в той же плоскости вращения, обрабатываемая поверхность изделия переместится и станет в такое положение, при котором точка выхода из зоны контакта режущего зерна станет точкой входа в зону контакта следующего режущего зерна.

В этом случае, ювенильная поверхность, образованная в результате снятия стружки режущим зерном уходит из зоны контакта с абразивным инструментом, и снова войдет в контактную зону только после полного оборота обрабатываемого изделия. Тем самым, промежуток времени  $(\Delta\tau_p)_i$  между двумя последовательными актами съема стружки с одного и того же участка обрабатываемой поверхности увеличивается до величины равной времени одного оборота детали. В результате этого с одной стороны, увеличивается время взаимодействия вскрываемой ювенильной поверхности с компонентами СОТС, а с другой стороны, облегчается их доступ к этой поверхности.

Из вышесказанного следует, что, при прочих равных условиях, каждому конкретному значению скорости круга  $V_k$  и поперечной подаче  $S_{поп}$ , соответствует конкретное (оптимальное) значение линейной скорости  $V_d$  вращения обрабатываемой поверхности изделия, при котором  $\Delta\tau_p$  максимально.

Аналитическое определение оптимального значения скорости вращения изделия сводится к решению уравнения (3) относительно  $V_d$ . Поскольку в этом уравнении параметр  $l_k$  зависит от  $V_d$  и  $S_{поп}$ , то выразим величину  $l_k$  следующим образом:

$$l_k = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_k \cdot d_d \cdot t}{D_k + d_d}} = \sqrt{\frac{4A \cdot D_k \cdot d_d^2 \cdot S_{поп}}{(D_k + d_d) \cdot V_d}} \quad (4)$$

где  $d_d$  – диаметр обрабатываемого изделия;

$D_k$  – диаметр абразивного круга;

$t$  – глубина шлифования.

После подстановки (4) в уравнение (3) и соответствующих преобразований получим кубическое уравнение вида:

$$\frac{l_p^2 (D_k + d_d)}{4A \cdot D_k \cdot d_d^2 \cdot S_{поп}} \cdot V_d^3 - V_d^2 - 2V_k \cdot V_d - V_k^2 = 0 \quad (5)$$

Решение этого уравнения однозначно определяет режимы круглого наружного врезного шлифования.

Для определения режимов шлифования с продольной подачей воспользуемся равенством производительностей  $W$  врезного (6) и продольного (7) шлифовании:

$$W = \frac{\pi}{4}(2d_d S_{\text{поп}} - S_{\text{поп}}^2) N_{\text{кр}} \quad (6)$$

$$W = \frac{\pi}{4}(2d_d S_{\text{поп}} - S_{\text{поп}}^2) S_{\text{пр}} \quad (7)$$

Таким образом, с точностью до 0,5% можем записать:

$$S_{\text{поп}} N_{\text{кр}} = S_{\text{поп}}^{\text{ход}} S_{\text{пр}} \quad (8)$$

Исходя из этого, режимы резания для наиболее распространенных условий круглого наружного шлифования представлены на диаграмме (рис. 1).

Порядок назначения режимов резания.

1. В зависимости от обрабатываемого материала, его твердости и характера операции (предварительная, окончательная) по традиционным рекомендациям [9 - 11] назначается абразивный круг.

2. Для выбранной зернистости круга из диапазона допустимых подач (0,1...0,5 мм/мин), (0,5...1,2 мм/мин), (1,2...2 мм/мин) назначается поперечная подача  $S_{\text{поп}}$  мм/мин.

3. Из точки, соответствующей выбранной поперечной подаче  $S_{\text{поп}}$ , восстанавливается вертикаль до пересечения с кривой, соответствующей диаметру обработки (25, 35, 50, 70, 100, 150, 200, 250 мм). Через точку пересечения проводится горизонталь, которая на оси ( $0, n_d$ ) указывает значение оборотов детали  $n_d$  об/мин. Для врезного шлифования расчет закончен.

4. Определяется значение поперечной подачи на ход стола  $S_{\text{поп}}$  мм/ход.

5. Определяется значение продольной подачи  $S_{\text{пр}}$  мм/мин.

Представленные режимы круглого шлифования были апробированы на стали 20Х13 и сплавах ВТ5, ЭИ957 (ХН60КВЮМБ) и ЖС6К, которые относятся ко II – VII группам обрабатываемости ТОМ [9]. Эти материалы наиболее часто используются для изготовления ответственных деталей типа турбинных лопаток, дисков, кулачковых валов и др. и обладают сравнительно высокой склонностью к засаливанию абразивного круга и возникновению шлифовальных трещин и прижогов.

Выбор абразивных кругов основывался как на рекомендациях нормативно-справочной литературы,

так и на их доступности и широте использования на практике. Поэтому использовались круги типа ПП 600×63×305 с абразивными зёрнами марок 14А, 15А, 23А, 24А и 25А, зернистостью 25, 40, 63, на керамической связке К1+К5, твердостью от СТ1 до СМ2 с номером структуры от 4 до 8. В качестве смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) применялся 2-х ...10%-й водный раствор кальцинированной соды (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), подаваемый в контактную зону поливом и распыливанием.

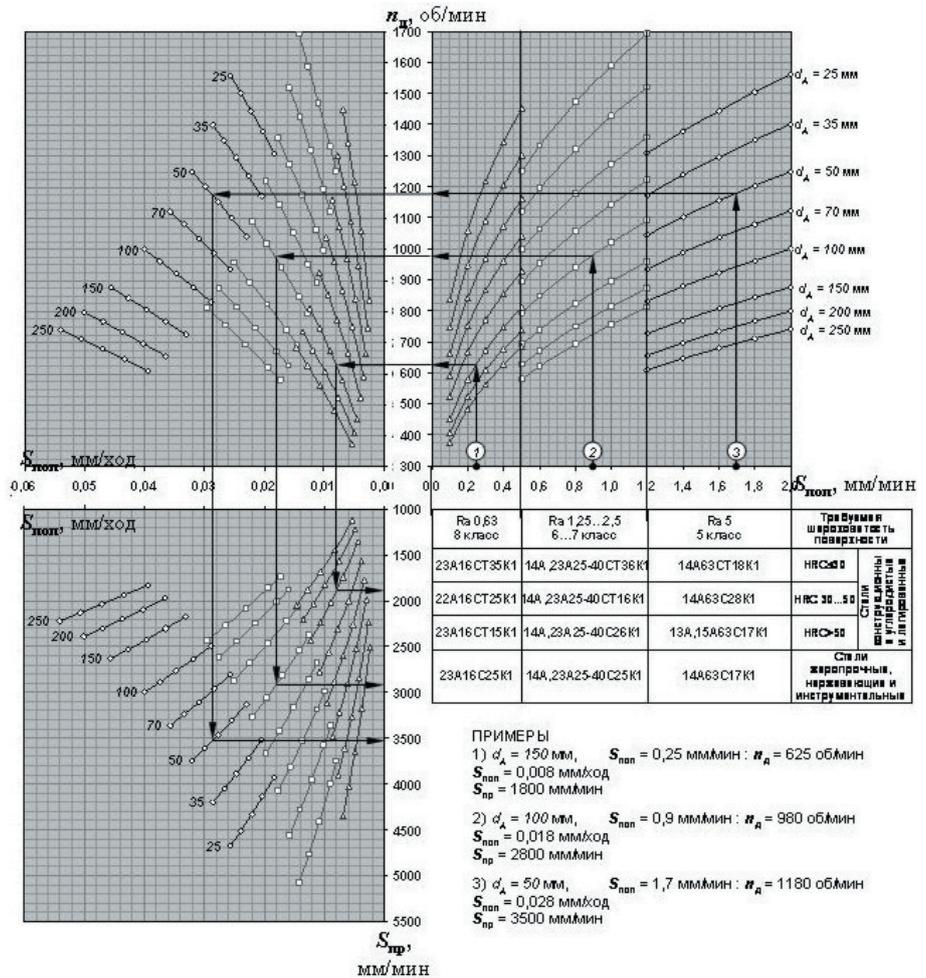


Рис. 1. Диаграмма режимов круглого наружного шлифования,  $V_k = 35$  м/с  
 Для  $V_k = 50$  м/с обороты детали  $n_d$  следует увеличить на 20%

Исследования проводились на шлифовальном стенде, смонтированном на базе круглошлифовального полуавтомата мод. 3А151, который был оснащен системой измерения электрической мощности, потребляемой приводом вращения изделия ( $N_d$ ) и приводом вращения абразивного круга ( $N_{кр}$ ), а также системой измерения скорости вращения изделия  $n_d$ . Контролируемые параметры регистрировались при помощи электронно-вычислительной системы автоматического сбора и обработки измерительной информации, собранной на базе ПК.

В качестве исследуемых объектов использовались цилиндрические образцы диаметром 40...100 мм. Обработка образцов осуществлялась методом врезного и продольного шлифования.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что при обработке всех исследованных материалов наблюдается снижение мощности, потребляемой приводом вращения изделия  $N_d$  и приводом вращения абразивного круга  $N_{кр}$ , существенное повышение производительности обработки.

Подача СОТС распылением на обрабатываемую поверхность в количестве 10...20 мл/мин обеспечивает успешную обработку исследованных ТОМ, при этом засаливание круга не наблюдается и стойкость круга значительно возрастает

На рис. 2 представлен график изменения микротвердости  $H_{\mu}$ , по глубине образцов из ЭИ957. Для всех материалов распределение микротвердости имеет аналогичный характер, что говорит о формировании упрочненного слоя обработанной поверхности. Металлографические исследования показывают отсутствие дефектов обработанной поверхности.

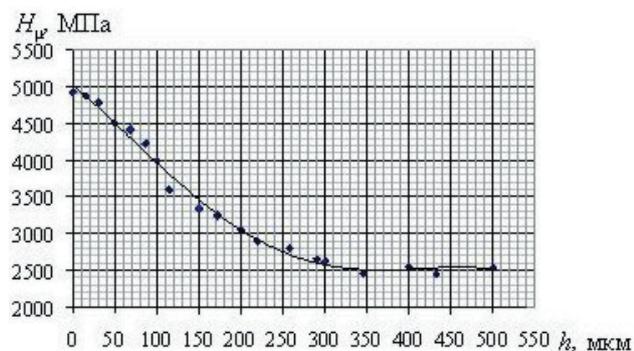


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине образца из сплава ЭИ957 ( $n_d = 1000$  об/мин,  $V_d = 4,5$  м/с,  $W=2,47$  мм<sup>2</sup>/с)

### Выводы

1. На основании критериев обеспечения адсорбционно-пластифицирующего эффекта при абразивном резании разработаны режимы круглого наружного шлифования ТОМ, которые позволяют их использование на серийных круглошлифовальных станках с учетом технических возможностей оборудования. Они представлены в виде номограммы, удобной для технологов и шлифовщиков.

2. Апробация режимов круглого шлифования показывает, что при обработке различных ТОМ (сталь 20Х13, сплавы ВТ5, ЭИ957, ЖС6К) обеспечивается:

- снижение тангенциальной составляющей силы резания и удельной работы шлифования в 1,5...3 раза;
- повышение удельной производительности обработки в 1,5...2 раза;

- отсутствие шлифовальных дефектов (прижогов, микротрещин, участков с пониженной твердостью);

- формирование упрочненного слоя на глубину 0,2...0,3 мм;

- уменьшение на порядок потребностей в расходе СОТС, при этом требования к их физико-химическим свойствам становятся менее критичными;

- повышение стойкости и износостойкости инструмента в 1,5...5 раз;

- отсутствие засаливаемости абразивных инструментов, что позволяет успешное использование для обработки различных ТОМ абразивных кругов с повышенной твердостью.

### Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975. – 334 с., ил.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностроительных и приборостроительных спец. вузов. - М.: Высш. шк., 1985. – 304 с., ил.
3. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах: Избр. тр. // Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 381 с.
4. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука. – 1985. – 160 с.
5. Зув Л.Б. Электрические поля и пластичность кристаллов // Соросовский образовательный журнал. – № 9, 1998. – С. 92–95.
6. Головин Ю.М. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // ФТТ. – 2004. – Т. 46. – Вып. 5. – С. 769 – 803.
7. Щукин Е.Д. Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды // Физ.-хим. механика материалов. – 1976. – № 1. – С. 3–20.
8. Сурду Н.В. Адсорбционное влияние сред при шлифовании // Пробл. машиностроения. – Харьков, 1999. – Т. 2. – №1-2. – с.106–113.
9. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с., ил.
10. Справочник шлифовщика / Кожуро Л.М., Панов А.А., Ремизовский Э.И., Чистосердов П.С.; Под общ. ред. Чистосердова П.С. – Мн.: Высш. школа, 1981. – 287 с., ил.
11. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания. Справочник / Баранников В.И., Жариков А.В., Юдина Н.Д. и др.; Под общ. ред. Баранникова В.И. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с., ил.