

и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с. 16. Титов А.В. Некоторые особенности формирования свойств поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании / Титов А.В., Хохлова Ю.А., Лавриненков А.Д. // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2009. – № 56. – С. 140-147.

УДК 621.92

Н.Ю. КАЛИНИЧЕНКО, аспирант

С.Е. МАРКОВИЧ, канд. техн. наук, доцент

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”,
Украина

ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ И ДЕТАЛЕЙ С ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Описана проблематика обработки шлифованием деталей из специальных сплавов и термическими газо-детонационными покрытиями. Рассмотрены проблемы внедрения в производство глубинного планетарно – сопряженного шлифования. Представлены практические рекомендации, связанные с выбором режимов обработки, режущего инструмента и применяемому оборудованию.

Ключевые слова: планетарное шлифование, планетарная шлифовальная головка, глубинное шлифование, температурное поле

Описана проблематика обробки шліфуванням деталей із спеціальних сплавів і термічними газо-детонаційними покриттями. Розглянуті проблеми упровадження в виробництво глибинного планетарно – спряженого шліфування. Наведені практичні рекомендації, пов’язані з вибором режимів обробки, ріжучого інструменту і застосованого обладнання.

Ключові слова: планетарне шліфування, планетарна шліфувальна головка, глибинне шліфування, температурне поле.

The problematic of processing by grinding of details from special alloys and thermal gas -detonation coverings is described. Problems of introduction in manufacture deep planetary – the interfaced grinding are considered. The practical recommendations connected with a choice of modes of processing, the cutting tool and are presented to the applied equipment.

Keywords: planetary grinding, planetary grinding head, creep-feed grinding, temperature field's.

Высокие требования, предъявляемые к авиационным двигателям, обуславливают широкое внедрение труднообрабатываемых материалов из специальных сплавов на титановой основе, жаропрочных сплавов, а так же деталей с защитными газо-детонационными покрытиями. Обработка данных материалов и композиций связана с рядом трудностей, что делает задачу прогнозирования эксплуатационных характеристик изделий и разработки единых технологических рекомендаций одной из наиболее актуальных. Особенно остро этот вопрос стоит при абразивной обработке, которая является универсальным методом обработки композиционных материалов, легированных сталей, труднообрабатываемых сплавов на титановой основе и деталей с износостойкими газо-термическими покрытиями, что обусловило её широкое применение в производстве. Одним из наиболее перспективных является метод глубинного планетарно – сопряжённого шлифования, который интенсифицирует процесс снятия материала и позволяет [1]: вести обработку на скоростях 100...180 м/с,

достичь скорости съёма материала $10...20\text{мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$, получать чистоту обработанной поверхности $Ra=0,8...1,25\text{ мкм}$, обрабатывать детали с твердостью от $200...220\text{ НВ}$ до $62...64\text{ HRC}_\ominus$. Однако широкое внедрение данного метода обработки сталкивается с рядом проблем, связанных с недостаточной изученностью физики процесса, методик прогнозирования физико-механических характеристик поверхностных слоёв обрабатываемой детали и методов расчёта и управления режимами обработки, обеспечивающими заданные эксплуатационные характеристики изделия.

Сложность проведения финишной обработки шлифованием деталей из титановых и жаропрочных сплавов связано с опасностью образования поверхностных дефектов: шлифовочных прижогов, трещин и т.д. Высокая термодинамическая напряжённость процесса шлифования становится причиной ухудшения условий обработки деталей с газо-детонационными покрытиями, с учётом специфических особенностей покрытий: структурная неоднородность, наличие развитой пористости и границы раздела “покрытие–подложка” [2]. Влияние всех этих факторов, может привести к отслоению покрытия, разупрочнению поверхностного слоя, интенсификации фазово–структурных превращений и образованию остаточных растягивающих напряжений.

Вопросы повышения качества и производительности обработки деталей из специальных сплавов и деталей с термическими покрытиями требуют решения целого комплекса задач: выбор способа и метода шлифования; подбор необходимого режущего инструмента (РИ) и оборудования, на котором возможно реализовать процесс обработки; выбор оптимальных режимов обработки. Одним из перспективных методов обработки является планетарно – сопряженное шлифование. К недостаткам данного способа обработки можно отнести следующее [3]: низкое значение коэффициента использования резерва режущих зёрен во времени приводит к низкой эффективности съёма материала. За время паузы в зоне обработки накапливается несошлифованный припуск. Разница в нагружении зёрен приводит к их интенсивному износу, либо к неэффективному использованию режущих. Третья негативная особенность заключается в том, что протяженность дуги мгновенного контакта, являющаяся зоной генерирования тепла, в планетарном и моноосевом способах обработки примерно одинакова, т.е. здесь так же нет рассредоточения тепловой энергии по поверхности детали. Отсутствие единой методики, позволяющей производить априорное прогнозирование физико-механические характеристики поверхностных слоёв после абразивной обработки, что так же не позволяет осуществлять корректирование режимов при активном контроле параметров процесса целью получения заданного комплекса свойств.

Целью исследований является разработка основных положений единой методики проектирования технологических процессов высокопроизводительной абразивной обработкой специальных сплавов и деталей с защитными газо-термическими покрытиями. Указанная проблематика требует решения следующих задач:

- анализ проблем связанных с высокой тепловой напряжённостью в зоне обработки;
- сложность проведения обработки шлифования в условиях затруднённого транспортирования смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки;
- анализ кинематических и технологических параметров планетарного глубинного шлифования;

– исследования состояния поверхности детали после обработки и влияние на них режимов обработки.

Одним из объектов исследования - тепловой процесс, являющийся определяющим при формировании поверхностного слоя детали. Высокая мгновенная температура в зоне резания приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали, изменений условий резанья, появлению тепловых деформаций, возникновению остаточных напряжений.

Также, среди комплекса вопросов, требующих решения при проектировании композиционных шлифовальных кругов (КШК), особое место занимает синхронизация линейного износа режущих и смазочных элементов при одновременном надёжном обеспечении заданного температурного режима в зоне обработки в конкретных технологических условиях.

Одним из перспективных методов обработки является планетарно – сопряженное шлифование, (рис 1).

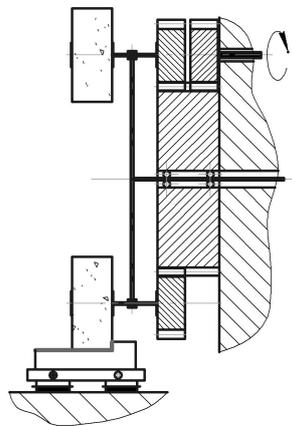


Рисунок 1 – Шлифовальная головка для глубинного шлифования плоских поверхностей (патент РФ № 2066268)

Данный способ предполагает использование планетарной шлифовальной головки, которая устанавливается на шпинделе вместо абразивного круга. Такой способ обработки обладает рядом преимуществ: увеличение интенсификации съёма материала в 10 раз с одновременным повышением стойкости инструмента в 8 раз [2]; в 2...4 раза снижается удельная энергоёмкость процесса; возможность использования в режиме глубинного шлифования с увеличением производительности до 2...5 раз по сравнению с традиционной технологией глубинного шлифования (патент РФ № 2066268); обеспечить шлифование со знакопеременными деформациями сдвига в поверхностном слое детали, что приводит к формированию остаточных напряжений сжатия на глубину 50...115 мкм [3].

В статье Ф.В. Новикова и Ю.Г. Гуцаленко [4] предложен способ увеличения фактической производительности обработки и жёсткости технологической системы путём повышения режущей способности круга, а так же за счёт ударно-циклического взаимодействия круга с обрабатываемой деталью, реализуя эффект запаздывания упругих перемещений системы от действия кратковременной силы. При определённых значениях частоты ω следования импульсов радиальной силы резания, фактическая и номинальная производительности обработки становится приблизительно одинаковыми. Это приводит к значительному увеличению динамической жёсткости и практически исключает “отжатие” в технологической системе.

Реализовать ударно-циклический характер взаимодействия круга с деталью авторы предлагают за счёт использования прерывистого круга, состоящего из чередующихся рабочих выступов и впадин. Однако по причине сложности создания такого круга, который бы создавал колебания с частотой $\omega = (1...3)10^3$ 1/с, в работе [4] предложено использовать ультразвуковые колебания круга, возбуждаемые специальным генератором ультразвуковых колебаний (ультразвуковой головкой). Наряду с увеличением производительности обработки, ударно-циклический контакт круга с деталью позволяет повысить точность обработки.

В связи с кратковременностью контакта обрабатываемого элемента детали с кругом и запаздыванием упругих перемещений системы от действия импульсной силы, в начальный момент контакта происходит более глубокое внедрение режущих зёрен в обрабатываемый материал, что ведёт к интенсификации съёма материала и износа круга. Обрабатываемая деталь при этом выполняет роль правящего инструмента, обеспечивает срезание верхних слоёв рабочей поверхности круга и непрерывное восстановление его режущих свойств.

Ударно-циклический характер контакта круга с деталью повышает эффективность шлифования труднообрабатываемых материалов за счёт увеличения глубины внедрения режущего зерна в материал [4].

$$H = \sqrt[3]{\frac{m \cdot V_0^2}{2\pi \cdot HV}}$$

где m – масса шлифовального круга; HV – твёрдость обрабатываемого материала по Виккерсу;

V_0 – скорость ультразвуковых колебаний.

С увеличением твёрдости обрабатываемого материала (для заданного значения H) необходимо увеличить амплитуду и частоту колебаний, то есть применение ультразвуковых колебаний, практически снимает ограничения обработки материала по твёрдости. С высокой производительностью могут обрабатываться стали, твёрдые сплавы, керамики, а так же синтетические и природные алмазы.

В работе [5] автором предложен метод уменьшения количества теплоты, образующейся при шлифовании, путём её рационального перераспределения в зоне контакта благодаря правильному подбору системы абразивное зерно – связка – импергнатор – СОЖ – обрабатываемая деталь. В качестве импергнатора выступают частицы меди. Влияние тепловых процессов на качество обработанной поверхности исследовали на образцах из стали 45 (40...45 HRC₅) при шлифовании кругами диаметром 500 мм [5]: стандартным марки 25A25CM2 К и импергнированным кругом (ИК) из такого же абразива (импергнирование осуществлялось частицами медно-графитового сплава на установке УВНР-450Э). Частота вращения шпинделя 283 об/мин, глубина шлифования 0,2 мм, параметр шероховатости $Ra=0,63$ мкм. Коэффициент температуропроводности для стали 45 принят равным $0,1$ см²/с, для ИК – $0,06$ см²/с (при условии, что абразивные зёрна занимают 75% объёма круга и их цепочки не сплошные).

После шлифования ИК микротвёрдость образцов снизилась с 8000 до 5000 МПа. Общая величина зоны распространения остаточных напряжений на поверхности образцов, шлифованных ИК, уменьшилась в 2 раза, причем в наибольшей степени сократилась зона растягивающих напряжений. Микронапряжения в слое толщи-

ной 20...25 мкм при шлифовании стандартным кругом возросли в 10 раз, а при шлифовании ИК снизилась в 6 раз [5].

Авторами статьи [6] предложены математические модели, расчётные методики и программное обеспечение для численного моделирования теплового состояния заготовки и КШК в процессе обработки, а так же для расчёта расхода смазочных элементов такого круга за счёт их выплавления. Установлены закономерности расхода смазочных элементов композиционного круга, свидетельствующие о возможности рационального выбора значений геометрических параметров такого круга, обеспечивающих согласование расхода режущих и смазочных его элементов в конкретных технологических условиях. КШК, сочетая преимущества прерывистых и импергированных шлифовальных кругов, позволяют снижать тепловую напряженность в зоне обработки и, как следствие, получать детали с качественными поверхностными слоями при более высокой производительности.

Конструктивно КШК – это круг, на рабочей поверхности которого чередуются режущие выступы и заполненные твёрдым смазочным материалом (ТСМ) вырезы, выполненные в виде пазов, прорезей и каналов (рис. 2).

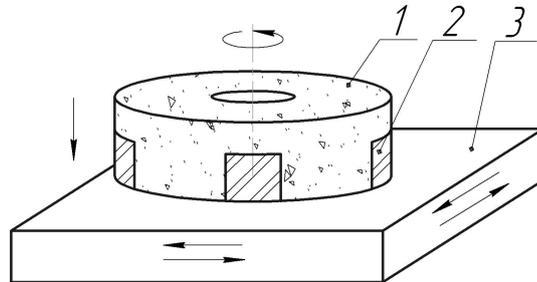


Рисунок 2 – Схема плоского торцевого шлифования композиционным кругом [6]:
1 – шлифовальный круг; 2 – твёрдый смазочный материал; 3 – заготовка.

Начальные условия задают распределение температур во взаимодействующих объектах в начальный момент времени ($\tau = 0$). Распределение считается однородным и равным температуре окружающей среды T_f ($T_f = T$).

Граничные условия однозначности определяют условия теплообмена на свободных поверхностях взаимодействующих объектов и в зоне контакта:

$$\lambda_{\text{кшк}} \left(\frac{\partial T}{\partial n_k} \right)_{n_k=0} + \lambda_3 \left(\frac{\partial T}{\partial n_3} \right)_{n_3=0} = q_{\text{выд}} - q_c - q_{\text{ст}} - q_{\text{пл}},$$

$$T_{\text{кшк}} = T_3$$

где n_k , n_3 – нормаль к поверхности соответственно шлифовального круга и заготовки на анализируемом участке зоны контакта;

$q_{\text{выд}}$ – поверхностная плотность теплового потока, выделившегося в зоне контакта;

q_c , $q_{\text{ст}}$, $q_{\text{пл}}$ – поверхностная плотность теплового потока, отводимого из зоны контакта соответственно в месте с СОЖ, стружкой и плавящимся смазочным элементом;

$T_{\text{кшк}}$, T_3 – местная контактная температура круга и заготовки соответственно.

В статье [6] Ковальногов В.Н. и Михайлин С.М. получили систему алгебраических уравнений:

- для расчётных данных элементов заготовки вне зоны контакта;
- для расчётных элементов круга вне зоны контакта;

- для расчётных элементов заготовки в зоне контакта;
- для расчётных элементов круга в зоне контакта.

Приведены результаты численного моделирования тепловой напряжённости плоского торцового шлифования модельной заготовки размером 45×15×15 мм из стали 45 с твердостью 40...42 HRC₃ композиционным кругом 1 – 250×76×25 характеристики 24A16HC18K26 со смазочными элементами из парафина с подачей в зону шлифования 3%-ной эмульсии Укринол-1. Режим шлифования: рабочая скорость круга $v_k=30$ м/с, скорость подачи стола $v_c=10$ м/мин, врезная подача $t = 0,03$ мм/ход [6].

В работе [7] рассмотрена кинематика формообразования при торцевом планетарном шлифовании, когда вращение наружного и внутренних шлифовальных кругов происходило в попутном и встречном направлениях с различной частотой. Исследования проводились на заготовках из материала – сталь 4X5M, шлифовальными кругами типа 6A2 и АЧК с размерами: $R=57,5$ мм, $r_{внутр}=31,5$ мм; на скоростях: $\omega_{внутр}=99,46$ рад/с, $\omega_k=80$ рад/с, $v_d=1,5$ м/мин. В результате выполненных исследований было установлено, что величина шероховатости R_a на 35...40% меньше по сравнению с обычным, моноосевым шлифованием.

В работах А.А. Горбачёва [8, 9] описан алгоритм расчёта величины подачи, определена функциональная связь технологических параметров, выполнен расчёт кинематических параметров процесса при плоском глубинном планетарном шлифовании. При определении величины подачи использовалось такое условие работы режущих зёрен, когда максимальная толщина стружки, снимаемая за проход, не превышает предельно допустимую величину, обеспечивая наиболее благоприятные условия обработки. В результате проведенных расчётов, автор получил выражения для определения: величины подачи детали и вывел соотношения скоростей шлифовального круга и головки при встречном и попутном их вращениях. Однако данная работа позволяет решать ограниченный круг задач. Рассмотренный алгоритм позволяет определять подачи детали и соотношения скоростей только для данной конструкции шлифовальной головки, вызывая определённые трудности при решении прикладных задач для процессов обработки специальных защитных покрытий.

Одним из методов обработки, который применяется при обработке хвостовиков и бандажных полок рабочих лопаток турбины и обеспечивает высокие требования по их качеству, является глубинное шлифование. В работе [1] автором получены экспериментальные кривые распределения остаточных напряжений в поверхностном слое для различных зон лопаток турбины после скоростного глубинного шлифования, (рис. 3 и 4) [1]. Обработка велась кругом из кубического нитрида бора на гальванической связке.

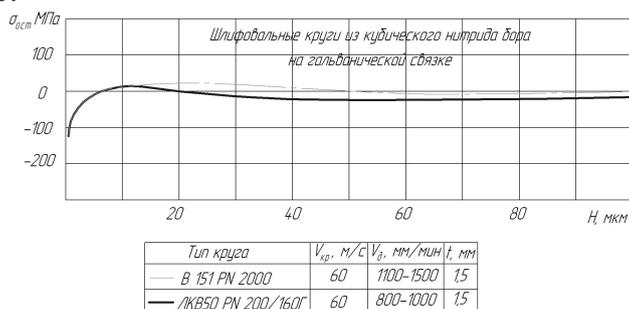


Рисунок 3 – Обработка дна бандажной полки рабочей лопатки [1]

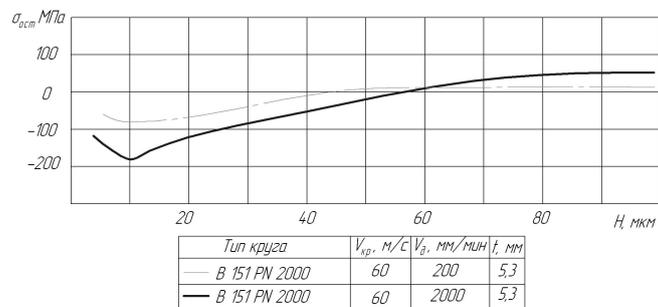


Рисунок 4 – Обработка наклонной стенки ребра лабиринта рабочей лопатки [1]

Результатом проведенных экспериментов стало уменьшение в 2...2,5 раза величины остаточных напряжений с учётом различных технологических условий обработки деталей из титановых сплавов, по сравнению с традиционным шлифованием. Важной и актуальной задачей современного авиадвигателестроения, является обеспечения высокого качества изготовления рабочих лопаток турбин.

Авторы работы [10] в своих исследованиях провели анализ, систематизацию и классификацию технологических операций, выполняемых глубинным шлифованием. Эксперименты проводились при формообразовании “ёлочного” профиля хвостовика лопатки из материала ЖС6У-ВИ и ЖС6К высокопористыми абразивными кругами 25А10ПЗИ2912К5КО40 и 25А16ПЗИ3312К5КО40 на станках модели SS013L и ЛШ-220 с охлаждением синтетической жидкостью “АКВОЛ-2”. Шероховатость поверхностей хвостовика лопаток турбины после глубинного шлифования не превышает $R_a=0,8...1,2$ мкм. В поверхностном слое “ёлочного” профиля хвостовиков стабильно формируются остаточные напряжения сжатия, (рис. 5) [10]:

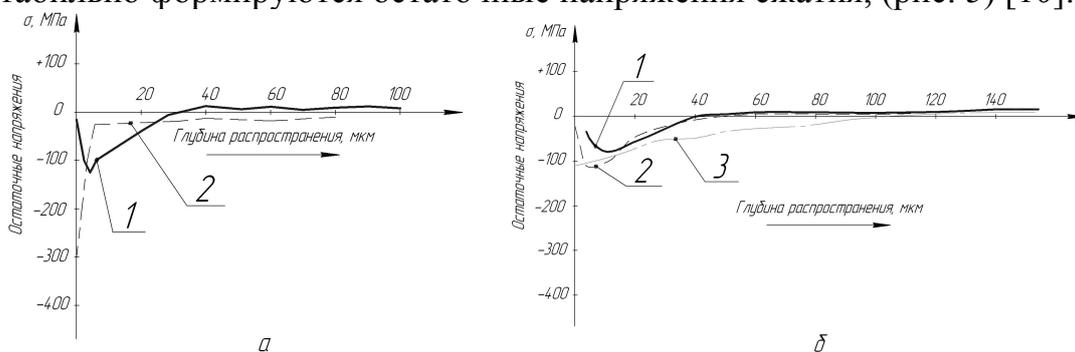


Рисунок 5 – Эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое “ёлочного” профиля хвостовика после глубинного шлифования:
 а – материал заготовки ЖС6К, инструмент – 25А10ПЗИ12К5КО40, станок модели – SS013L; б – материал ЖС6У-ВИ, инструмент – 25А16ПЗИ3312К5КО40, 1, 2, 3 – обрабатываемые лопатки [10]

Максимальная величина остаточных напряжений сжатия для материала ЖС6К 150...300 МПа, а для ЖС6У-ВИ 75...125 МПа; глубина распространения сжимающих напряжений в поверхностном слое 40...80 мкм; повышение предела выносливости на 4...7%; величина степени наклёпа – 5...12%; глубина наклёпанного слоя 0,03...0,04 мм. Результаты работы [10] позволяют более целенаправленно применять глубинное шлифование совместно с планетарно – сопряженным при обработке различных поверхностей конструктивных элементов рабочих лопаток турбины, а так же более рационально устанавливать технологические условия и режимы обработки, обеспечивающие высокое качество при изготовлении деталей из жаропрочных никелевых сплавов.

Способ планетарного шлифования позволяет вести обработку обычными абразивными кругами на керамической основе со скоростью шлифования 40...60 м/с на всю глубину снимаемого припуска. Для глубинного шлифования жаропрочных на никелевой основе созданы шлифовальные круги из сверхтвёрдого абразивного материала – кубического нитрида бора с высокими механическими и теплофизическими свойствами. Режущая способность и долговечность такого инструмента существенно выше, чем у кругов из электрокорунда [1].

Таким образом, в настоящее время проведен достаточно большой объём исследований, позволяющих оценить теплонапряжённость процесса. Однако большинство из них имеют существенные ограничения в области применения, что связано с необходимостью аналитического описания процессов. Результатом проводимых исследований, как указывалось ранее, является создание единого подхода к проблеме априорного прогнозирования эксплуатационных характеристик изделий и разработке технологических рекомендаций. При разработке универсальной модели, которая может быть использована при оценке поля температур различных схем обработки (глубинное, высокоскоростное, планетарное шлифование и др.) с учётом воздействия внешних факторов, в качестве исходных использован ряд положений, продемонстрировавших удовлетворительную сходимость расчётных данных с экспериментальными (табл. 1).

Таким образом, в качестве математического метода исследования температурных полей деталей авиационных двигателей, обрабатываемых шлифованием, наиболее универсальным является метод конечных элементов (МКЭ), который предоставляет возможность учёта геометрии процесса (закон движения абразивного зерна), количество зерен, проходящих через точку контакта в секунду, вероятностную плотность режущих зерен, радиус скругления вершины зерна по отношению к зернистости круга, время контакта зерна с элементом, влияние ПАВ и СОЖ и т.д.

Проведенный анализ прикладных работ, позволяет выделить следующие рекомендации, обеспечивающие наиболее производительную обработку шлифованием (табл. 2).

Таблица 1

Исходные элементы модуля расчёта поля температур

Источник	Начальные условия	Граничные условия	Входные данные	Выходные данные	Недостатки
Ковальногов В.Н., Михайлин С.М.	$\tau = 0$ $T = T_f$	$\lambda_{\text{кшк}} \left(\frac{\partial T}{\partial n_k} \right)_{n_k=0} + \lambda_3 \left(\frac{\partial T}{\partial n_3} \right)_{n_3=0} = q_{\text{выд}} - q_c - q_{\text{ст}} - q_{\text{пл}};$ $T_{\text{кшк}} = T_3$	ρ, c, λ - плотность, удельная теплоёмкость и теплопроводность заготовки, КШК, СОЖ; v_c - скорость стола;	\tilde{T}^3 - температура заготовки вне зоны контакта; \tilde{T}^k - температура круга вне зоны контакта;	Вносятся погрешность в тепловой расчёт от величины

			z – число смазочных элементов; D – диаметр круга;	$\tilde{T}^{кз}$ - температура заготовки в зоне контакта; $\tilde{T}^{кк}$ - температура круга в зоне контакта	ны фактической площади контакта круга с заготовкой S_m
Чирков Г.В.	-	Заготовка считается не прогреваемой на всю глубину за один рабочий ход	λ - теплопроводность детали и круга; a – коэффициент температуропроводности; v - скорость вращения; s – подача детали; K_p -коэффициент разности высотности зёрен	$T(x_0; z_0)$ - температурное поле детали; α - количество теплоты уходящей в шлифовальный круг и деталь	Модель не учитывает количества тепла уносимого СОЖ и уходящего со стружкой
Иванова Т.Н.	$t=0$	$t \in \left[0, \frac{2\pi}{\omega_k} \right]$	t – время; R – межцентровое расстояние между центрами наружного и внутреннего кругов; $\omega_{внутр}$ - угловая скорость вращения внутреннего круга; ω_k - угловая скорость вращения наружного круга; r – радиус внутреннего шлифовального круга	$M(x, y, t)$ -траектория движения абразивного зерна при плоском планетарном шлифовании.	Модель не учитывает износ режущего инструмента

Таблица 2

Значения оптимальных режимов шлифования, полученные авторами [5, 10, 6]

Источник данных	Оборудование	Заготовка				глубина t , мм	Sпрод, мм/мин	СОЖ	Шлифовальный круг
		Геометрия, мм	HRCэ	Ra, мкм	материал				
Чирков Г.В.	3М71	30×30×15	40...45	0,63	сталь 45	0,2	10 см/с	-	25А25СМ2К
									ИК-круг
Качан А.Я.,	SS-01 3L и ЛШ-2	Образец 1,2×2×31	-	0,8.. 1,2	ЖС6К	1,3	95..10 0	АКВ ОЛ-2	25А10ПЗИ 12-К5КО40
						0,15	130		

Богуслаев А.В., Мозговой В.Ф. (глубинное шлифова- ние)	20		-		ЖС6У- ВИ	0,15	200		25А16ПЗИ 33- 12К5КО40
						3,5	60..75		
						0,45	110.. 130		
						0,45	150		
Ковально- гов В.Н., Михайлин С.М.	-	250×76×2 5	40..42	-	Сталь 45	-	16 см/с	Укр -ин ол- 1	24А16НС18 К26

Как показал анализ рассмотренных работ, метод глубинного планетарно – сопряжённого шлифования является одним из наиболее перспективных, высокоэффективных и экономически целесообразных методов при обработке деталей из жаропрочных и специальных сплавов: ЖС6К, ЖС6У-ВИ; а так же с защитными газо-детонационными покрытиями на основе сормаита и Al_2O_3 . Широкое внедрение данного метода в производство требует решения ряда проблем: связанных с высокой тепловой напряженности в зоне обработки [6], низкой фактической производительности шлифования по причине недостаточной жёсткости крепления детали на станке [4], определение величины и вида остаточных напряжений [1, 10]. В настоящее время разработаны и рекомендованы к внедрению отдельные математические модели процессов, позволяющие рассчитать: параметры и необходимые характеристики КШК, влияющие на температуру в зоне резания [6], частоту ударно-циклических колебаний шлифовальной головки [4], скорости вращения шлифовального круга и головки, подачу детали [8, 9]. Однако большинство моделей имеют существенные ограничения, что не позволяет использовать их без существенной доработки для описания даже родственных процессов обработки. Для формирования единого подхода к проблеме априорного прогнозирования эксплуатационных характеристик изделий и разработке технологических рекомендаций, необходимо создание модели процесса, построенной на базе МКЭ, что позволяет производить оценку поля температур различных схем обработки (глубинное, высокоскоростное, планетарное шлифование и др.) с учётом особенностей геометрии процесса, вероятностной плотности режущих зёрен, радиуса скругления вершины зерна по отношению к зернистости круга, времени и особенностей контакта зерна с отдельными участками поверхности, влияние ПАВ и СОЖ

Список литературы: 1. Толоконников В. Заместитель ген. директора УМПО, к.т.н. Интегральная технология: от философии к практике: <http://engine.aviaport.ru> 2. Пилипенко А.М. Повышение эффективности шлифования деталей с износостойкими плазменными и детонационными покрытиями: Автореферат канд. техн. наук / АН УССР, Ин-т сверхтвёрдых материалов.– К., 1987.–16 с. 3. Буюкли И.М. Повышение эффективности периферийного планетарного шлифования деталей из конструкционных материалов: Автореферат канд. техн. наук / Одес. политехн. ин-т. – Одесса., 1990. –16с. 4. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Управление динамикой процесса шлифования // Високі технології в машинобудуванні, 1999. 5. Чирков В.Г. Влияние импергнирования шлифовального круга на качество обработки // Технология машиностроения, вып. № 2, 2007. 6. Ковальногов В.Н., Михайлин С.М. Теплофизический анализ как основа проектирования композиционных шлифовальных кругов // Известия вузов. Машиностроение, вып. № 3, 2006. 7. Иванова Т.Н. Кинематика формообразования при торцовом планетарном шлифовании

// Известия Челябинского научного центра, вып. 1 (31), 2006. 8. Горбачёв А.А. Определение кинематических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей // Авиационно – космическая техника и технология, вып. №2 (18), 2005. 9. Горбачёв А.А. Определение технологических параметров планетарного глубинного шлифования плоских поверхностей // Авиационно – космическая техника и технология, вып. №5 (21), 2005. 10. Качан А.Я., Богуслаев А.В., Мозговой В.Ф., Алексеенко О.В. Глубинное шлифование хвостовиков и бандажных полок рабочих лопаток турбин // Авиационно-космична техніка і технологія, вип. №5 (40), 2003

УДК 621.723

В.Я. ДАНИЛЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»

В.О. ЄВСТРАТОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

В.І. КУЗЬМЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Для характеристики стану фосфатного мастильного покриття запропоновані нові терміни: скінограма, а також часткові коефіцієнти суцільності K_{cz} (поздовжній) і $K_{c\theta}$ (тангенціальний). Для визначення K_{cz} й $K_{c\theta}$ створено пристрої ДС-1 й ДС-2, які дозволили визначити K_{cz} й $K_{c\theta}$ на будь-якій ділянці контактної поверхні у вигляді скінограми або числа. Експериментально встановлено, що коефіцієнти суцільності залежать від виду операції, форми інструмента й розмірів заготовки. Уведено важливе для підвищення стійкості штампів поняття – діаграма зношування. Дано дефініцію нового для обробки металів тиском терміна – шлях тертя $L(k)$. Наведено функцію, за допомогою якої можна обчислити $L(k)$ залежно від координати k контактної поверхні деформуючого інструмента. Для визначення тертя на контактних поверхнях інструмента в процесах пластичної деформації автори розробили пристрій ДТ-4, що дозволила визначити τ_k при нормальних тисках аж до $\sigma_n / \sigma_s = 8$. Експериментально досліджували тертя на контактних поверхнях сталевих фосфатованих зразків, просочених концентратом НБ-5 або господарським милом. На підставі експериментів побудовані графіки залежності коефіцієнта тертя $\mu_n = \tau_k / \sigma_n$ від нормального тиску σ_n і швидкості переміщення заготовки по інструменту v_0 .

Для характеристики состояния фосфатного смазочного покрытия предложены новые термины: скинограмма, а также частные коэффициенты сплошности K_{cz} (продольный) и $K_{c\theta}$ (тангенциальный). Для определения K_{cz} и $K_{c\theta}$ созданы устройства ДС-1 и ДС-2, которые позволили определить K_{cz} и $K_{c\theta}$ на любом участке контактной поверхности в виде скинограммы или числа. Экспериментально установлено, что коэффициенты сплошности зависят от вида операции, формы инструмента и размеров заготовки. Введено важное для повышения стойкости штампов понятия – диаграмма изнашивания. Дана дефиниция нового для обработки металлов давлением термина – путь трения $L(k)$. Приведена функция, с помощью которой можно вычислить $L(k)$ в зависимости от координаты k контактной поверхности деформирующего инструмента. Для определения трения на контактных поверхностях инструмента в процессах пластической деформации авторы разработали устройство ДТ-4, что позволило определить τ_k при нормальных давлениях вплоть до $\sigma_n / \sigma_s = 8$. Экспериментально исследовали трение на контактных поверхностях стальных фосфатированных образцов, пропитанных концентратом НБ-5 или хозяйственным мылом. На основании экспериментов построены графики зависимости коэффициента трения $\mu_n = \tau_k / \sigma_n$ от нормального давления σ_n и скорости перемещения заготовки по инструменту v_0 .

For phosphate lubrication coating state analysis we define such terms as scinogramm and also partial coefficients of lubricant coating ratio K_{cz} (longitudal) and $K_{c\theta}$ (tangential). For their experimental