

А.И. Долматов, Н.Ю. Калиниченко, С.Е. Маркович

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРОБЛЕМЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ И ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ, НАНЕСЕННЫМИ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

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.

глубинное планетарно-сопряжённое шлифование, газо-детонационное покрытие, периферийное планетарное шлифование, планетарная головка, износостойкие покрытия, плотность тепловых потоков

Введение

Высокие требования, предъявляемые к авиационным двигателям, обуславливают широкое внедрение труднообрабатываемых материалов из специальных сплавов на титановой основе, жаропрочных сплавов, а также деталей с защитными газо-детонационными покрытиями. Шлифование является универсальным методом обработки композиционных материалов, легированных сталей, труднообрабатываемых сплавов на титановой основе и деталей с износостойкими газо-термическими покрытиями, что обусловило его широкое применение в производстве. Одним из наиболее перспективных является метод глубинного планетарно-сопряжённого шлифования, который интенсифицирует процесс снятия материала и позволяет: вести обработку на скоростях 100...180 м/с, достичь скорости съёма материала 10...20 мм³/мм·с, получать чистоту обработанной поверхности Ra=0,8...1,25 мкм, обрабатывать детали с твердостью от 200...220 HB до 62... 64 HRC₉.

1. Проблемы внедрения абразивной обработки специальных сплавов

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” [1]. 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 [2]: 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.

2. Постановка задачи и цель исследования

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 распределением поверхностной плотности тепловых потоков по поверхности заготовки;
- определение составляющих силы резания и давления при обработки защитных газо-термических покрытий.

В связи с увеличением теплонапряженности процесса остро стоит проблема получения данных о распределении тепловых потоков по шлифуемой поверхности заготовки в режиме реального времени.

Особое внимание следует уделить проблеме финишной обработки газо-детонационных покрытий. Шлифование таких покрытий характеризуется напряженным состоянием напылённой поверхности. Это обусловлено опасностью отслоения покрытия, которая возникает в процессе шлифования. Важной особенностью механической обработки наплавленных покрытий является то, что обрабатываемая поверхность состоит из отдельных выступов и впадин глубиной 2...3 мм. В начальный момент обработки имеет место небольшая фактическая площадь контакта РИ с обрабатываемым материалом. Это ведёт к повышенному износу алмазного круга и удорожания процесса шлифования.

3. Методики определения физико-механических характеристик поверхностных слоёв детали после абразивной обработки

В работе Хусаинова А.Ш. [3] предложены новые методы получения информации о распределении поверхностной плотности тепловых потоков по шлифуемой поверхности заготовки. Для определения поверхностной плотности теплового потока в работе [3] применялись методы: сравнения температур, интегральный и последовательный, использующие ЭДС одной термопары, заложенной в глубине заготовки. Метод сравнения условно устойчив и требует знания распределения температур. Для этого метода термодатчик был заложен на глубину 0,1 мм с частотой опроса датчика 2500 Гц. Для интегрального метода замеры производились на разных глубинах при 20 последовательных проходах, при этом погрешность по-

считанного теплового потока составляла 25...50%. Последовательный метод самый неточный и его погрешность достигала 50%. Для эксперимента применялись одноразовые заготовки. В результате проведенных экспериментов и на основании расчётов была получена зависимость, (рис. 1) [3]: для круга 1 – $225 \times 40 \times 76$ 24A40ПСМ17К5; материала заготовки – сталь ХВГ, твёрдостью 55...59 HRC₉; $V_K = (28...35)$ м/с, $V_3 = 10$ м/мин, $S_t = 0,02$ мм/дв. ход; подача поливом 0,5%-го содового раствора с расходом 10 дм³/мин.

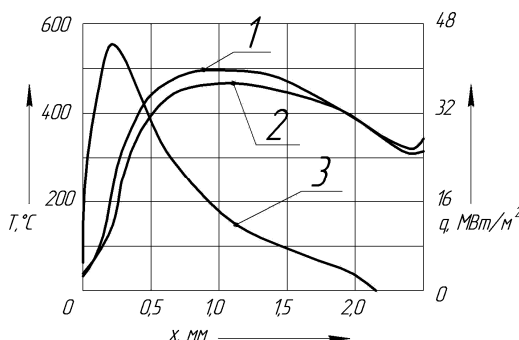


Рис. 1. Температура в поверхностном слое заготовки и поверхностная плотность теплового потока в зоне плоского встречного шлифования [3]:
1, 2 – температура на глубине 15 и 65 мкм соответственно;
3 – поверхностная плотность потока

Таким образом, интегрально – аппроксимационный метод позволяет вычислить поверхностную плотность теплового потока по температурным откликам одной полуискусственной термопары при заданном законе изменения поверхностной плотности. Погрешность расчёта на большей части ширины теплового источника в среднем не превышала 5%. Данная методика определения величины и характера распределения поверхностных тепловых потоков может быть применена к абразивной обработке шлифованием инструментальных высоколегированных сталей и труднообрабатываемых специальных сплавов. Погрешность, имеющая место в расчёте температур при абразивной обработке шлифованием, вследствие неточного учёта теплофизических свойств, форм и перемещений объектов, участвующих в процессе резания, приводила к увеличению локальных температур в зоне резания. Это становилось причиной: интенсивного налипания частиц материала заготовки к абразивным зёрнам, повышению

вероятности образования дефектов в поверхностном слое заготовки и снижению стойкости абразивного инструмента.

В работе [4] автором разработаны физические и математические модели для расчета температур при шлифовании, позволяющие в комплексе учесть форму контактирующих объектов: абразивного зерна, заготовки, РИ и стружки, относительное перемещение этих объектов, расположение отдельных источников тепловыделения, наложение тепловых импульсов от отдельных зёрен; зависимость теплофизических свойств объектов и механических характеристик материала заготовки от температуры. Исследования выполнялись для схемы плоского многопроходного шлифования периферией круга, с учётом реальной формы контактирующих объектов: абразивного зерна (АЗ), круга и стружки.

В качестве АЗ предлагается усечённая пирамида с углом при вершине 2γ площадкой затупления l_2 ; форма заготовки в виде прямоугольного параллелепипеда; форма стружки – совокупность прямоугольных параллелепипедов различной толщины. Авторами принималась двумерная постановка задачи теплового взаимодействия, поскольку изменение температур в направлении оси вращения шлифовального круга незначительно и им можно пренебречь. Пограничный слой между АЗ, стружкой и заготовкой и его термическое сопротивление можно не учитывать, так как контакт между этими телами в условиях пластической деформации приближается к идеальному. Поэтому считаем, что температура в любой точке на поверхности соприкосновения контактирующих тел одна и та же. Теплообмен считается нестационарным, поскольку АЗ вступают в контакт с заготовкой периодически. Для повышения достоверности результатов, автор учёл зависимость сопротивления материала заготовки пластическому деформированию и зависимость теплофизических свойств всех взаимодействующих объектов от температуры. Предполагается, что заготовка 1 неподвижна, а режущее АЗ 2, шлифовальный круг 4, стружка 3 и плоскость сдвига DE перемещаются относительно заготовки, со скоростью $V_{кр}$ и скоростью подачи V_S (рис. 2) [4]. Система координат XOY связана с зерном и перемещается относительно заготовки в направлении оси OX со скоростью $V_{кр}$. Автор работы [4] представил уравнения теплопроводности для заготовки 1, АЗ 2, стружки 3 и шлифовального круга 4.

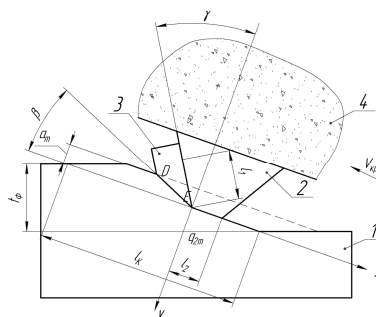


Рис. 2. Схема контакта режущего АЗ с заготовкой:

1 – заготовка; 2 – АЗ; 3 – стружка; 4 – круг; l_k – длина дуги контакта круга с заготовкой; l_1 – длина контакта стружки с поверхностью АЗ; l_2 – размер площадки затупления АЗ; t_{ϕ} – глубина шлифования; β – угол сдвига; γ – угол при вершине зерна [4]

В результате проделанных расчётов автором [4] было определено, что на каждый элементарный участок заготовки от момента входа его в зону действия тепловых импульсов, являющихся результатом диспергирования материала заготовки отдельными АЗ. Для расчёта количества тепловых импульсов, воздействующих на каждый элементарный участок, получена зависимость, учитывающая: длину дуги контакта круга с заготовкой l_k ; скорость круга $V_{кр}$; скорость продольной подачи V_{Snn} и среднее расстояние между диспергирующими зёрнами t_{ϕ} . Адекватность математических моделей реальным условиям проверялась авторами путём сравнения средней температуры в зоне контакта, полученную расчётным путём, с температурой, измеренной методом полуискусственной термопары. Расхождения между расчётными и экспериментальными данными не превышали 15%. Моделирование теплового состояния системы производилось при следующих исходных данных: материал заготовки – сталь 30Х; материал АЗ– электрокорунд белый; $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{Snn} = 10$ м/мин; глубина шлифования $t_{\phi} = 0,01$ мм; СОЖ– эмульсия Укринол-1 (3%). В результате проведённых экспериментов авторами было установлено, что вблизи от вершины АЗ на площадке его контакта с заготовкой локальные температуры достигают температуры плавления материала зерна. Результаты численного моделирования позволяют разработать рекомендации по снижению

локальных температур и интенсивности адгезионного взаимодействия абразивных зёрен с заготовкой в режиме глубинного планетарно – сопряженного шлифования.

Авторами работы [5] исследован процесс шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU – покрытием. Разработана математическая модель, позволяющая определить при шлифовании тангенциальную силу резания, температуру на обработанной поверхности и остаточные напряжения покрытия любого химического состава. Авторами получены оптимальные режимы шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU покрытием при шлифовании: кругами из карбида кремния зелёного, электрокорунда белого и алмазного круга, обеспечивающие наибольшую работоспособность термического газо-детонационного покрытия. В статье [5] разработана математическая модель, учитывающая физику процесса шлифования, с последующим проведением вычислительного эксперимента. Температура шлифования $T_2(y, \tau)$, приведенная к обработанной поверхности, учитывающая, что мощность теплового источника неравномерно распределена по пятну контакта шлифовального круга с деталью и тепловая мощность в данной точке пятна контакта зависит от конкретной координаты x ; геометрии пятна контакта a, b ; скорости перемещения детали относительно теплового источника V_0 ; радиуса закругления зерна r ; коэффициента температуропроводности обработанной поверхности α_2 [5]. Как свидетельствуют результаты исследований зависимости режимов обработки и зернистости шлифовального круга [5], при возрастании глубины резания, единичные силы резания снижаются, так как происходит уменьшение сечения стружки, снимаемой режущим зерном, а увеличение глубины увеличивает дугу контакта круга с деталью и, следовательно, увеличивается число работающих зёрен. Увеличение поперечной подачи практически не влияет на единичные силы резания.

Разработанная математическая модель, позволяющая определить при шлифовании тангенциальную силу резания, температуру на обрабатываемой поверхности заготовки и остаточные напряжения покрытий любого химического состава, применима для перспективного метода глубинного планетарно – сопряженного шлифования. Авторы работы получили оптимальные режимы обработки деталей с композиционным покрытием TiC-

NiC-CU шлифованием на неавтоматизированном производстве кругами [5]:

карбида кремния зелёного: $t = 0,005, 0,01$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1;

электрокорунда белого: $t = 0,005, 0,01$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1, С1;

алмазными кругами: $t = 0,005, 0,01, 0,03$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 12, 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1.

В качестве перспективного метода обработки рекомендуется использование интегральной технологии абразивной обработки на основе глубинного шлифования. Центральной идеей интегральной технологии является соединение в едином процессе этапа формообразования сложнопрофильных поверхностей с этапом формирования высококачественного слоя детали. К преимуществам данного метода следует отнести: увеличение производительности обработки более чем в 10 раз; по скорости съёма металла он в несколько раз превосходит методы лезвийной обработки материалов; исключить технологическую наследственность, свойственную многооперационным технологиям обработки; сократить трудоёмкость обработки деталей. К недостаткам этого метода можно отнести: применение специальных станков для глубинного шлифования, обладающих большей жёсткостью; использование инструмента с высокими физико-механическими и теплофизическими свойствами.

В работе [6] Гуцаленко Ю.Г. предлагает уменьшить удельный расход алмаза за счёт увеличения глубины резания вплоть до величины снимаемого припуска, то есть, применив глубинное шлифование. В начальный момент обработки в связи со шлифованием отдельных выступов покрытия фактическая производительность значительно меньше номинальной, заданное значение силы можно обеспечить при увеличенном значении номинальной производительности обработки. Это предполагает применение многопроходного шлифования с глубиной шлифования существенно ниже максимальной высоты неровностей покрытия и увеличенными значениями продольной подачи или скорости детали. По мере съёма припуска номинальная производительность обработки должна уменьшаться, а фактическая производительность – оставаться неизменной. Это достигает-

ся уменьшением во времени глубины шлифования или продольной подачи, которые определяют производительность обработки.

Как свидетельствуют экспериментальные исследования [6] на универсальном круглошлифовальном станке 3Б12, с увеличением напряжения источника технологического тока (ИТТ-35) при круглом наружном алмазно-искровом шлифовании кругами 1А1 производительность обработки покрытия (3Х2В8) непрерывно увеличивается [6]. Проведя серию экспериментов при шлифовании с переменной подачей, автор работы установил, что с уменьшением поперечной подачи S_n по мере съёма припуска удельный расход алмаза q_v уменьшается. В условиях шлифования с переменной во времени поперечной подачей S_n удельный расход алмаза q_v в начальный период обработки неровностей наплавки удаётся снизить на 30%, сократив средний расход алмаза на шлифование неравномерного припуска не менее, чем на 8 мг/см^3 .

Шлифование, с изменяющейся номинальной производительностью обработки Q , позволяет практически исключить повышенный удельный расход алмаза в начальный момент обработки при контакте вершин неровностей поверхности покрытия с алмазным кругом.

Заключение

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 также с защитными газо-детонационными покрытиями: TiC-NiC-CU и на основе Al_2O_3 . Широкое внедрение данного метода в производство требует решения ряда проблем: распределения поверхностной плотности тепловых потоков по поверхности заготовки [3], определение величины и вида остаточных напряжений [5]. В настоящее время разработаны и рекомендованы к внедрению отдельные математические модели процессов, позволяющие рассчитать: температуру в зоне резания, характер распределения поверхностной плотности тепловых потоков [3, 4], тангенциальную силу резания и остаточные напряжения покрытия любого химического состава [5, 6]. Данные модели могут быть использованы в

качестве модулей для универсальной математической модели, позволяющие производить априорное прогнозирование физико-механических характеристик поверхностных слоёв материала после абразивной обработки.

На основании проведенного анализа прикладных работ можно выделить следующие рекомендации: при обработке деталей с покрытием на основе сормаита и электрокорунда с микротвёрдостью покрытия $HV_{100} > 4,5$ ГПа экономически выгодно применять круги на связке М2-01, на следующих режимах: $t = 0,02$ мм; $S_{non} = 1,8$ мм/ход; $V_d = 13,87, 15$ м/мин, если $Q = 0,85 \dots 0,90$ см³/мин [1].

Литература

1. Пилипенко А.М. Повышение эффективности шлифования деталей с износостойкими плазменными и детонационными покрытиями: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / АН УССР, Ин-т сверхтвёрдых материалов. – К., 1987. – 16 с.
2. Буюкли И.М. Повышение эффективности периферийного планетарного шлифования деталей из конструкционных материалов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / Одес. политехн. ин-т. – Одесса., 1990. – 16 с.
3. Хусаинов А.Ш. Новые методы определения поверхностной плотности тепловых потоков при шлифовании // Обработка материалов резанием. – 2006. – № 4 (34). – С. 45-51.
4. Унянин А.Н. Аналитические исследования локальных температур при шлифовании // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 4-9.
5. Клименко Н.Н., Лебедев В.Г. Исследование процесса шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU – покрытием // Проблемы техники. – 2003. – № 2. – С. 76-80.
6. Гуцаленко Ю.Г. Физические особенности шлифования износостойких наплавленных покрытий // Високі технології в машинобудуванні. – 1999. – С. 21-27.

Поступила в редакцию: 15.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.