

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**



МАТЕРИАЛЫ

**2-й студенческой научно-технической конференции
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ОБОРУДОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

26 апреля 2018 года

Электронный учебный материал

Донецк 2018

УДК 621.6-9; 658.5

Материалы 2-й студенческой научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование в машиностроении» 26 апреля 2018 г. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2018. – 58 с.

Редакционная коллегия:

Гусев В.В., Молчанов А.Д., Полтавец В.В., Киселева И.В., Цокур В.П.

Издание включает материалы студенческой научно-технической конференции по следующим направлениям: создание и применение прогрессивных технологий и технологических систем. Нетрадиционные технологии; информационные технологии; механизация и автоматизация производственных процессов; управление качеством, метрология, сертификация; моделирование и расчеты сложных технических систем.

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Донецкий национальный технический университет.
Факультет инженерной механики и машиностроения
ул Артема, 58, г. Донецк,
тел.: (062)3010-7-15
E-mail:
msmo@fimm.donntu.org
<http://kmsmo.fimm.donntu.org/>

© ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

СОДЕРЖАНИЕ

Акимов А.И., Киселева И.В. Анализ роботов с параллельной кинематикой	4
Воробьев А.А., Гусев В.В. Описание процесса износа алмазных зёрен при шлифовании керамики	7
Лазарев Д.С., Гусев В.В. Исследование влияния материала притира при правке свободным абразивом алмазных шлифовальных кругов при обработке керамики	14
Майданюк М.Р., Полтавец В.В. Влияние внешних и внутренних параметров на характеристики цангового патрона	21
Макаренко Р.И., Молчанов А.Д., Гусев В.В. Выбор оптимального режима магнитно-абразивного полирования внутренних отверстий деталей из оксидной керамики	27
Мосеров К.Н., Полтавец В.В. Основные направления повышения показателей работоспособности и стойкости шлифовального инструмента при использовании СОЖ	34
Портной П.В., Молчанов А.Д. Обзор системы автоматического управления на базе нечеткой логики	38
Рыжаев А.А., Поезд С.А. Симулятор промышленных роботов и его возможности.....	43
Узун В.И., Поезд С.А. Моделирование распределения температурных полей в Solidworks	48
Чернорай А.А., Полтавец В.В. Математическое описание динамических параметров процесса внутреннего врезного шлифования	55

АНАЛИЗ РОБОТОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Акимов А.И., Киселева И.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация. В статье рассмотрены роботы с параллельной кинематикой, описаны особенности их конструкции и функций.

Ключевые слова: робот, параллельная кинематика, манипулятор, скорость, точность, жесткость, дельта-робот.

В последние годы применение роботов практически во всех сферах человеческой деятельности стремительно растет. Они в состоянии выполнять те работы, которые человек не может выполнить, например, осуществлять высокоточную обработку и сборку деталей различных размеров, вплоть до миниатюрных с размерами в доли миллиметра. Для выполнения всех этих операций робот должен обладать высокой гибкостью и большой рабочей зоной, высокой точностью позиционирования, иметь большое количество управляемых осей.

Для выполнения этих задач используются роботы с последовательной технологией связи (рис. 1), когда каждая дополнительная ось смонтирована на предыдущей. Данная конструкция позволяет перемещать объект в любых направлениях, обеспечивая роботу требуемую гибкость и большую рабочую зону. Однако при этом уменьшается точность позиционирования и жесткость конструкции робота.

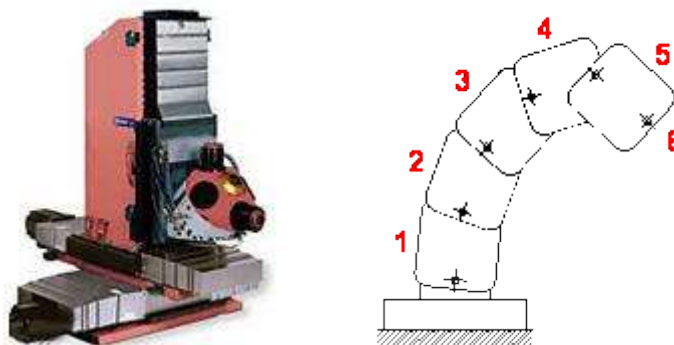


Рис. 1. Робот с последовательной кинематикой, обслуживающий металлообрабатывающий станок

Перед машиностроением стоит задача максимального повышения производительности обработки. Этого можно достичь за счет применения станков с ЧПУ и интенсификации режимов обработки. Для достижения высокой точности обработки станки должны обладать высокой жесткостью и точностью. Таким образом, станкостроительные предприятия должны разрабатывать машины с крупными конструкциями и широкими станинами, чтобы высокая точность и жесткость также соблюдалась в конце последнего узла и привода. Однако из-за этого станок теряет какую-либо гибкость, которая является прерогативой роботов-манипуляторов.

Что бы решить эти проблемы, были спроектированы роботы с параллельной кинематикой. Этот вид конструкции означает, что движения по координатам X, Y и Z выполняются тремя или большим количеством параллельных приводов, которые дают высокую

жесткость и точность с сохранением оптимальной гибкости и полным охватом рабочей зоны (рис. 2).

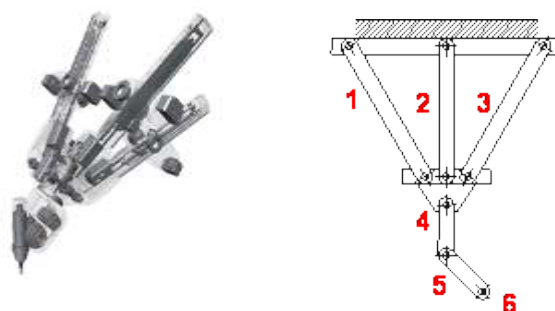


Рис. 2. Робот с параллельной кинематикой

В 2004 была разработана технология Exechon, которая перенесла технологию ПКМ – параллельную кинематику машин на следующий уровень, внося серию гексаподов и триподов, выполненных в виде токарных, фрезерных, многоцелевых станков и инженерных разработок, получивших промышленное применение на предприятиях ряда отраслей. Самыми распространёнными роботами с параллельной кинематикой являются дельта-роботы, которые используются для автоматической сортировки, загрузки и разгрузки деталей.

Дельта-робота придумал в начале 1980-х гг. швейцарский учёный Реймонд Клавель; ниже приведена иллюстрация из оригинального патента US4976582 на «Устройство для перемещения и позиционирования элемента в пространстве» (рис. 3).

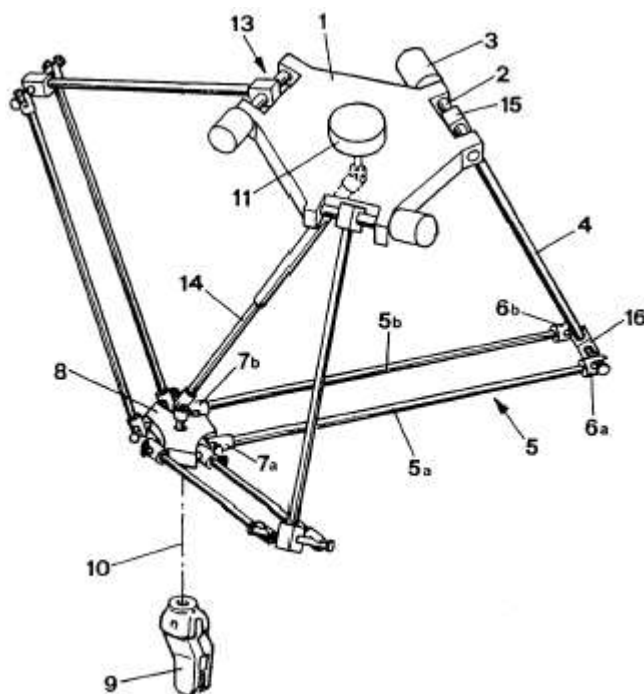


Рис. 3. Конструкция дельта-робота

Робот состоит из двух платформ: неподвижно закреплённого верхнего основания (1) и небольшой подвижной платформы (8), соединённых тремя рычагами. Каждый рычаг

состоит из двух частей: верхнее плечо (4) жёстко соединено с двигателем (3), расположенным на верхнем основании, а нижнее представляет собой параллелограмм (5), в углах которого установлены т.н. универсальные шарниры (6, 7), которые позволяют углам изменяться. Каждый параллелограмм соединён с верхним рычагом шарниром (16) таким образом, чтобы его верхняя сторона всегда оставалась перпендикулярной своему рычагу и параллельной плоскости верхнего основания. Благодаря этому подвижная платформа робота, прикрепленная к нижним сторонам параллелограммов, также будет всегда параллельной верхнему основанию. Управлять положением платформы мы сможем, изменяя угол поворота верхних рычагов относительно основания робота при помощи двигателей. В центре нижней платформы (8) крепится т.н. рабочий орган робота (9). Это может быть манипулятор, захватывающее устройство или, например, экструдер в случае 3D принтера. Дополнительно может использоваться ещё один двигатель (11), который обеспечивает вращение рабочего органа через штангу (14).

Главным преимуществом дельта-роботов является скорость: тяжёлые двигатели размещены на неподвижном основании, движутся только рычаги и нижняя платформа, которые стараются изготавливать из лёгких композитных материалов, уменьшая тем самым их инерцию.

Достоинство данной конструкции заключается в следующем:

- точная обработка фрезерованием поверхностей вращения;
- обработка деталей со сложной геометрией;
- высокая скорость без убытка в точности;
- синхронная пятиосевая обработка;
- компактность.

Данный вид робота обеспечивает высокие показатели по точности и скорости обработки, что в свою очередь является основным фактором при единичном и мелкосерийном производстве, а также при сортировке деталей на линии. Недостатками этих машин являются малая рабочая зона и весьма большие габариты, если речь идет о металлообработке, и неэффективность их использования во время обработки простых деталей с низкими критериями по точности, где рациональнее использовать обычные манипуляторы с последовательной кинематикой.

Вывод.

Роботы с параллельной кинематикой являются эффективным решением с точки зрения достижения высокой точности и скорости работы. Главной их особенностью остается высокая жёсткость конструкции, что обеспечивает лучшие параметры позиционирования основного рабочего органа в отличие от обычных роботов и манипуляторов с последовательной кинематикой. Роботы указанной конструкции широко используются в протезировании, авиастроении, космической промышленности и 3D-печати.

Список литературы: 1. Клеветов, Д.В. Разработка технологии автоматизации процесса монтажа печатных плат с применением механизмов с параллельной кинематикой / Д.В. Клеветов // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). – СПб.: Реноме, 2011. – С. 62-67. – Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/2/227>. 2. Сайт «Альфа интех». Режим доступа: <http://alphajet.ru/content/robot-standok-s-parallelnoi-kinematikoj>. 3. АИР. агентство инноваций и развития экономических и социальных проектов. – Режим доступа: <https://www.innoros.ru/news/foreign/14/12/evolyutsiya-delta-robotov>. 4. Сайт «Geektimes». – Режим доступа: <https://geektimes.com/post/270890/>.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ ЗЁРЕН ПРИ ШЛИФОВАНИИ КЕРАМИКИ

Воробьев А.А., Гусев В.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация: В статье рассмотрен процесс износа алмазного шлифовального круга на микроуровне. Описан процесс изнашивания отдельного зерна до момента его выпадения.

Ключевые слова: абразивный круг, связка, шлифование, керамика, площадка износа, усталость.

Введение

Всевозрастающие потребности различных отраслей машиностроения в новых материалах, обладающих новыми свойствами, способствуют более широкому использованию технической керамики (ТК). Изделия из ТК могут применяться практически во всех отраслях промышленности, где изделия из металла уже исчерпали свои возможности или используются на пределе своих возможностей (рис. 1). По этой причине в последнее время керамические изделия все чаще замещают металлические и полиметаллические изделия.



Рис. 1. Изделия из технической керамики

Для обеспечения качественного и точного изготовления изделий из керамики, большинство производителей применяют, в качестве окончательной механической обработки алмазное шлифование и полирование, так как эти виды обработки дешевле лазерной, ультразвуковой обработки, не требуют внедрения нового дорогостоящего оборудования, обучения персонала.

Вследствие высокой твердости ТК при ее обработке алмазные шлифовальные круги (ШК) теряют свои режущие свойства. При шлифовании ТК параметры рабочей поверхности круга (РПК) изменяются, возрастают силы резания, снижается производительность обработки, на поверхности изделий могут образовываться микро- и макротрещины, увеличиваются отклонения формы детали, снижается точность и т.д., что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках изделий в частности, на снижении их прочности [1].

Физическая модель изнашивания абразивного круга

Себестоимость обработки напрямую связана с эффективным использованием алмазоносного слоя ШК. Это определяет необходимость исследования расхода алмазоносного слоя при обработке и, что немаловажно, при восстановлении режущей способности ШК

при правке. Одним из комплексных показателей, оценивающих состояние РПК, является режущая способность ШК. Она определяется объемом материала (m^3) удаленного в единицу времени (c) с поверхности образца при постоянном усилии (H) его поджатия к поверхности шлифовального круга.

Эксплуатационные свойства инструмента зависят от его качества и, прежде всего, от его характеристики. Если случайные вариации качества заключены в довольно узких границах, то эксплуатационные свойства такого инструмента довольно стабильны. При резких колебаниях качества инструмента стойкость и износ одних инструментов сильно отличаются от других. Следует также учитывать, что даже у одного инструмента наблюдается неравномерность свойств на отдельных участках. Причиной неравномерного износа абразивного инструмента может также быть накопление необратимых изменений в связке круга, это нивелирует действие охлаждающих жидкостей на связку круга.

Качество поверхности обработанной детали определяется еще и состоянием РПК, которое изменяется в процессе работы. Сразу после правки при обработке с постоянным поджимом круга к обрабатываемой поверхности производительность шлифования наибольшая. Уровень начальной производительности определяется подготовкой режущей поверхности круга, скоростью резания, давлением и другими факторами. После правки выступание зерен из связки на рабочей поверхности круга наибольшее, режущая способность наибольшая.

По мере удаления материала припуска происходит изменение состояния РПК. Характер износа определяется физико-механическими свойствами абразивного и обрабатываемого материалов, величиной силовых и температурных нагрузок на зерна в процессе работы. В результате силового и теплового воздействий на зерна при обработке керамики наблюдаются следующие виды износа: образование площадок износа на вершинах режущих кромок вследствие абразивного и адгезионного изнашивания (рис. 2), выкрашивание (скалывание) микрочастиц абразивных зерен и вырывание целых (или оставшейся их части) абразивных зерен из связки (рис. 3). Наиболее выступающие зерна из связки круга глубже внедряются в обрабатываемый материал и на них действуют большие значения силы резания. Эти зерна разрушаются в первую очередь. Разрушение зерен носит вероятностный характер.

Исследование процесса изнашивания шлифовального круга

Вероятность разрушения зерна возрастает при увеличении заглубления зерен, а с ростом их размера и прочности связки снижается. Критическое значение силы удержания зерна зависит от удерживающей способности связки. В качестве характеристики удерживающей способности связки применяют силу, которую необходимо приложить к зерну для удаления его из связки, при конкретном значении относительной заделки ε , равно $\varepsilon = h/d_3$, где d_3 – диаметр зерна. Слабо удерживаемые связкой зерна выпадают. На долю износа истиранием в зависимости от обрабатываемого материала и характеристики абразива приходится 3-10% от общего износа ШК. Износ круга за счет диспергирования зерен прямо пропорционален площади среднего сечения среза на них. При шлифовании хрупких неметаллических материалов перед поверхностью зерна и с боковыми поверхностями образуются канавки (см. рис. 2а, 3а), а за зерном формируется спинка.

С увеличением удаленного с заготовки материала припуска разновысотность зерен на РПК уменьшается. Число зерен, участвующих в удалении припуска возрастает. Глубина внедрения зерен уменьшается. Изменяется механизм разрушения обрабатываемого материала. Возрастает доля удаления припуска пластическим деформированием. Удельная энергоемкость разрушения припуска возрастает.

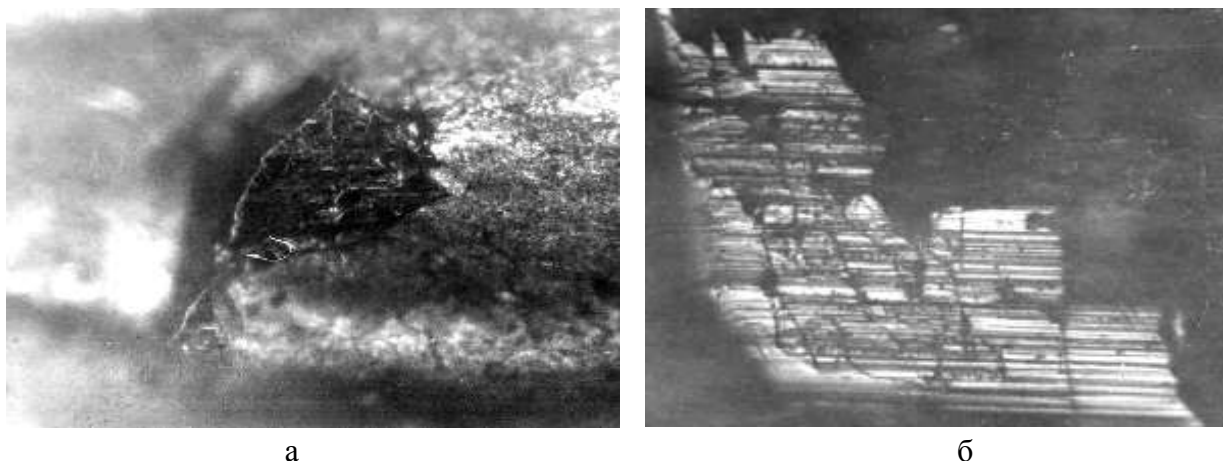


Рис. 2. Алмазное зерно при шлифовании ситалла АС–418 кругом 1А1 200х32х10х3 А 315/250-4-М1 при продольном круглом шлифовании с режимами $V_k=33$ м/с, $t = 0,5$ мм, $S_{prod} = 3$ мм/мин

- а) алмазное зерно с площадкой износа при увеличении $\times 200$ раз;
- б) вид площадки износа на алмажном зерне при увеличении $\times 500$ раз.

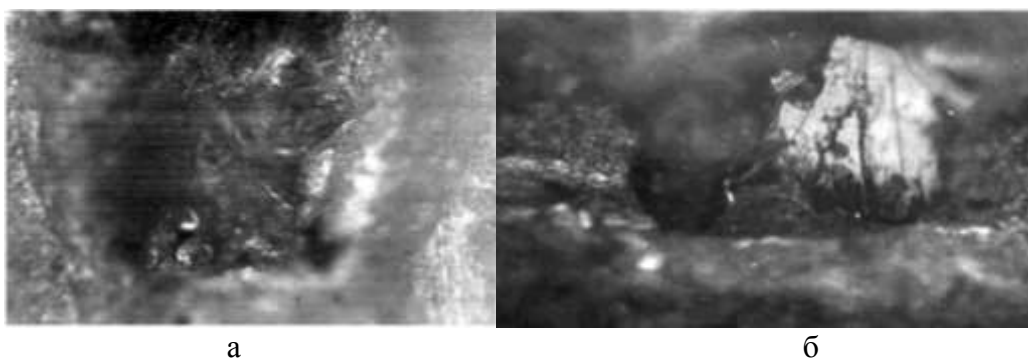


Рис. 3. Вид поверхности зерна алмазного круга 1А1 200х32х10х3 А 315/250-4-М1 при круглом глубинном продольном наружном шлифовании ситалла АС – 418 с режимами: $V_k = 35$ м/с, $V_d = 0,3$ м/с, $t = 0,5$ мм, $S_{prod} = 4$ м/мин

- а) зерно со сколотой вершиной при увеличении $\times 210$;
- б) расколотое зерно при увеличении $\times 210$.

С образованием площадок износа на зернах радиальное усилие, необходимое для внедрения их в обрабатываемый материал возрастает. Суммарная радиальная сила на единичном зерне шлифовального круга возрастает (рис. 4). Поэтому при постоянной силе поджима образца к поверхности круга объем удаленного материала в единицу времени снижается, режущая способность круга уменьшается. Интенсивность уменьшения режущей способности не одинакова в различные периоды работы круга. По окончании начального периода процесс шлифования протекает с медленно снижающейся производительностью независимо от способа правки. Для повышения режущей способности в металлические связки начали вводить абразив, антифрикционные присадки, твердые смазочные материалы [2].

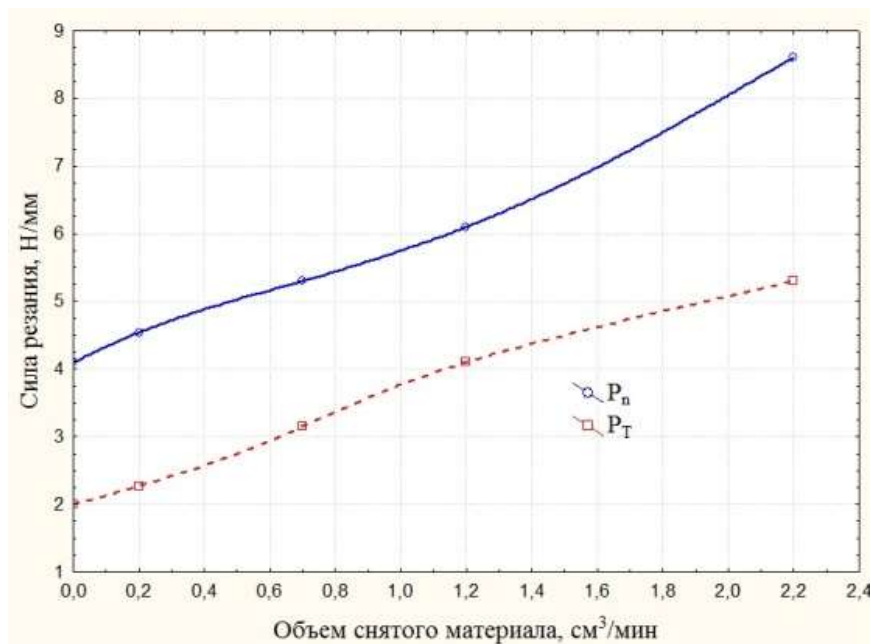


Рис. 4. Зависимость изменения погонного значения составляющих силы резания (P_n – нормальная составляющая силы резания, P_T – тангенциальная составляющая силы резания) от объема снятого материала Al_2O_3 (Гп) при плоском врезном шлифовании кругом 1A1 200x20x32 AC6-4-M2-01-125/100 с режимами резания: $V_k = 24$ м/с; $V_d = 6$ м/мин; $t = 0,1$ мм

Параметры поверхностного слоя изделия зависят от интенсивности шлифования (режима обработки) и состояния РПК. Чем выше производительность, тем больше параметр R_a шероховатости и глубже трещиноватый слой. Шероховатость обрабатываемой поверхности непосредственно зависит от того, какие механизмы разрушения материала припуска реализуются в тех или иных условиях шлифования, насколько быстро происходит процесс приспособляемости инструмента к обрабатываемому материалу. У кругов на металлических связках процесс саморегулирования рабочего профиля наблюдается на протяжении некоторого времени после правки, а затем может происходить постепенное сглаживание рельефа или образование рабочего профиля круга, который соответствует установившемуся процессу взаимного разрушения обрабатываемой и режущей поверхностей. Условия формирования поверхностного слоя отличаются от первоначальных. Это заставляет изучать процесс износа ШК и осуществлять управляющие воздействия на рабочую поверхность круга для корректировки ее текущего состояния. При увеличении сил резания, по мере уменьшения разности высот зерен на РПК, образования площадок износа, возможен брак при изготовлении деталей из керамики вследствие скалывания краев и растрескивания пластин, увеличения глубины трещиноватого слоя. Чем больше хрупкость керамики, тем выше вероятность скалывания краев заготовки.

Так, например, после правки влияние тепловых процессов и сил резания на образование дефектного слоя в изделиях и ТК минимально. Но с изменением состояния РПК воздействие круга на формирование дефектного слоя возрастает. Структура дефектного слоя (максимальная полудлина обработочных трещин l_{0max} и параметр трещиноватости r_0) зависит от индекса хрупкости обрабатываемого материала и силового воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны режущего инструмента. Параметры структуры обработочных дефектов будут иметь следующий вид:

$$f(l_o) = \frac{r_o + 1}{l_{o\max}} \left(1 - \frac{l_o}{l_{o\max}}\right)^{r_o}, \quad r_o \geq 0, \quad 0 \leq l_o \leq l_{o\max},$$

$$l_{o\max} = F_1(HV/K_{1c}),$$

$$r_o = A \cdot P_{yH} \left(V_k, t, V_d, S, HV/K_{1c} \right)^{-F_2(HV/K_{1c})},$$

где HV – твердость материала по Виккерсу; K_{1c} – трещиноватость обрабатываемого материала; P_{yH} – погонная радиальная нагрузка по высоте круга, в Н/мм, зависящая от V_k, t, V_d , – параметры режима обработки: скорость круга, глубина обработки, скорость заготовки, продольная подача соответственно; HV/K_{1c} – индекс хрупкости материала; A – постоянный коэффициент, зависящий от условий обработки; $F_1(HV/K_{1c}), F_2(HV/K_{1c})$ – функции, определяющие, соответственно, зависимость максимальной полудлины обработочной трещины $l_{o\max}$ и показатель степени r_o .

Чем ниже показатель степени r_o , тем доля крупных дефектов в поверхностном слое возрастает. Таким образом, из формулы видно, что одним из факторов, оказывающих негативное воздействие на показатель степени r_o , является погонная радиальная нагрузка P_{yH} , с увеличением которой в поверхностном слое после обработки возрастает доля крупных дефектов, что приводит к снижению прочности изделий. Таким образом, большое влияние на формирование дефектного слоя поверхности КК оказывает, в первую, очередь состояние рабочей поверхности алмазных кругов.

Для предотвращения недопустимых изменений в поверхностном слое заготовки из керамики при обработке необходимо периодически вносить коррективы в состояние РПК на металлической связке, в которых практически отсутствуют процессы саморегуляции (самозатачивания).

Наиболее достоверную и обширную информацию о характере износа алмазного инструмента можно получить, измеряя линейные размеры или координаты отдельных точек инструмента до и после работы. Подробно об этом написано в [3].

Плотность распределения вершин алмазных зерен по высоте характеризуется двух-параметрическим распределением Вейбулла (собственно плотность распределения вершин зерен по высоте РПК и линейный износ ШК).

Исходное состояние разновысотности вершин алмазных зерен круга после правки и ее изменение при обработке хрупких неметаллических материалов в соответствии с экспериментальными результатами адекватно описывается распределением Вейбулла с плотностью

$$f(u) = \frac{\delta}{\lambda} \cdot u^{\delta-1} \cdot \exp\left(-\frac{u^\delta}{\lambda}\right),$$

где δ и λ – параметры распределения ($\delta > 0, \lambda > 0$), u – расстояние от условной окружности наиболее выступающих зерен до вершины исследуемого зерна. Все эти параметры определялись экспериментально по результатам профилографирования круга непосредственно на станке.

График распределения разновысотности после правки и при обработке конструкционной керамики Al_2O_3 представлен на рис. 5.

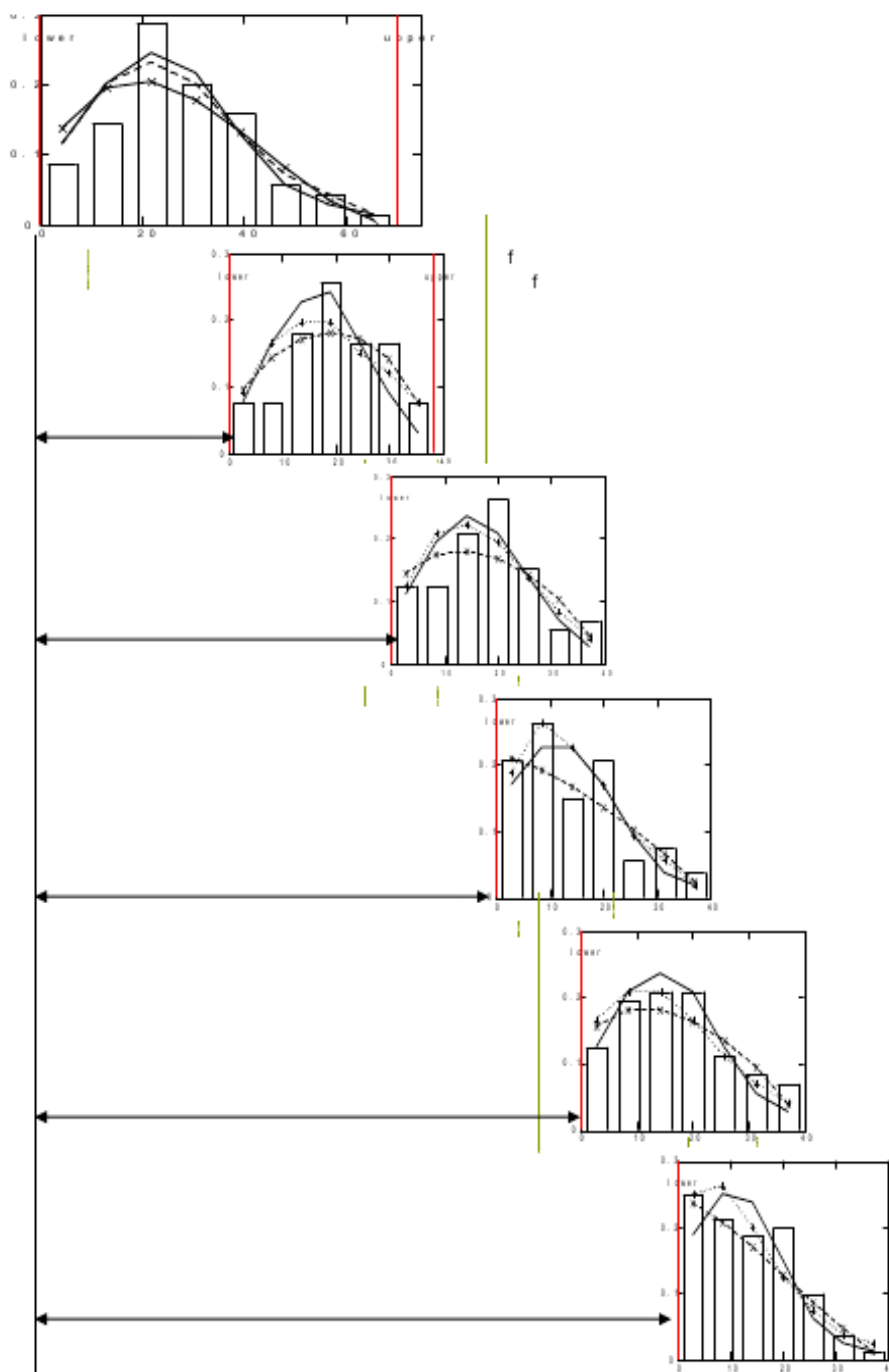


Рис. 5. Разновысотность шлифовальных зерен (гистограмма) и линейный износ ШК (горизонтальная ось)

Как видно из приведенного графика, в процессе работы шлифовального круга плотность распределения вершин алмазных зерен по высоте переходит от нормального закона к правоасимметричному, что увеличивает число одновременно работающих зерен, снижает удельный припуск на каждое зерно, но приводит к повышению доли абразивного изнашивания вершин алмазных зерен. Полученные данные подтверждают результаты проведения эксперимента при обработке алмазным кругом керамики Al_2O_3 Гп на следующих режимах: $V_k = 24$ м/с; $V_d = 6$ м/мин; $t = 0,1$ мм. При обработке использовался алмаз-

ный круг 1A1 200x20x32 AC6-4-M2-01-125/100. Результаты эксперимента занесены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты исследования износа алмазного шлифовального круга при обработке керамики Al_2O_3 Гп

После-следовательность исследования дования круга	Объем удаленной керамики, $см^3$	Линейный износ, мкм	Удельные силы резания, Н/мм		Плотность зерен на рабочей поверхности, шт/мм ²	Параметры законов распределения					
			нормальная	вертикальная		Нормальный			Вейбулла		
						\underline{a}_{cp}	σ^2	χ^2	δ	λ	χ^2
1	0	0-	2,9	2,19	8,05 19,6	24,66	12,5	6,13	2,02	923	4,14
2	2	30	4,54	2,27	7,59 17,7	18,7	11,31	10,96	1,73	217	7,17
3	7	51	–	–	7 15,8	18,72	9,67	18,2	1,69	234	7,1
4	12	65	6,1	4,1	7,18 16,4	–	–	–	–	–	–
5	22	108	13,6	–	7,23 16,5	15,55	8,97	4,37	1,61	130	1,68

Выводы

Установление основных закономерностей, связывающих геометрические и физические параметры рельефа режущей поверхности с параметрами процесса резания и критериями качества обрабатываемой поверхности, позволяет перейти к нормированию и контролю основных характеристик рабочей поверхности круга. Для прогнозирования качества поверхностного слоя деталей из керамики после обработки необходимо изучить влияние длительности обработки (объема снятого материала припуска) на изменение силы резания, уменьшить влияние состояния параметров круга на формирование поверхностного слоя технической керамики. Это заставляет изучать изменение состояния рабочей поверхности круга в процессе его эксплуатации, оценивая, какие параметры технологического процесса оказывают наибольшее влияние на скорость изменения этого состояния.

Список литературы: 1. Пташников, В.С. Физическая и нормативная твердость абразивных инструментов из высокотвердых и сверхтвердых материалов. Часть 1. Физическая твердость абразивных инструментов / В.С. Пташников // Сверхтвердые материалы. Научно-практич. журнал. – 2004. – №4. – С. 75-88. **2.** Пташников, В.С. Физическая и нормативная твердость абразивных инструментов из высокотвердых и сверхтвердых материалов. Часть 2. Физическая твердость абразивных инструментов / В.С. Пташников // Сверхтвердые материалы. Научно-практич. журнал. – 2004. – №5. – С. 74-83. **3.** Гаршин, А.П. Абразивные материалы / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Ю.В. Лагунов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 231 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИТИРА ПРИ ПРАВКЕ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ КЕРАМИКИ

Лазарев Д.С., Гусев В.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

E-mail: msmo@fimm.donntu.org

Аннотация. В статье приведены экспериментальные исследования влияния процесса шаржирования абразивных зерен в материал притира и усилия при правке на эффективность правки алмазного шлифовального круга свободным абразивом при обработке керамики.

Ключевые слова: шлифование, правка, алмазный шлифовальный круг, свободный абразив, притир.

Введение

Керамика является первым искусственным материалом, полученным человеком. Он был известен еще с глубокой древности и использовался, в основном, для изготовления посуды, декоративных и бытовых изделий. Позже, в 20 веке, с развитием технологии настала эпоха «пластмасс и керамики». Так появилась ее техническая разновидность, используемая в приборостроении, электротехнике, транспорте, энергетике, машиностроении, медицине и других областях [1].

Алмазное шлифование является наиболее эффективным способом съема материала припуска в керамических заготовках вследствие их высокой твердости. К шлифовальному кругу, как к режущему инструменту, предъявляются большие требования в отношении поддержания остроты режущих кромок и сохранения требуемой формы профиля круга. Если прочность закрепления абразивных зерен в инструменте ниже прочности самих зерен, то изнашивание происходит за счет выкрашивания зерен, а круг работает в режиме самозатачивания. Самозатачиванием называют свойство круга сохранять работоспособность вследствие образования новых режущих кромок в процессе обработки. Если прочность абразивных зерен окажется ниже прочности их закрепления в шлифовальном круге, то изнашивание происходит частично за счет хрупкого разрушения и скалывания зерен, а частично – в результате их истирания обрабатываемым материалом. Такое изнашивание носит название затупления круга и заключается в образовании площадок износа на поверхности абразивных зерен и уменьшении режущей способности инструмента, что проявляется в увеличении силы резания до двух раз. Кроме того, неравномерный износ круга приводит к изменению его профиля. Нестабильность рабочих характеристик шлифовального круга, изменение их во время обработки заготовок приводит к изменению качества поверхностного слоя детали. Поэтому возникает необходимость в правке шлифовального круга [2].

Цель работы. Исследование влияния шаржирования абразивных зерен в притир на эффективность процесса правки свободным абразивом.

1. Исследование влияния материала притира на шаржирование в него свободного абразива

Влияние материала притира на процесс правки оценивалось вероятностью шаржирования P зерен свободного абразива в материал притира. Для анализа процесса шаржирования зерен в материал притира нами была разработана установка, схема которой приведена на рис. 1.

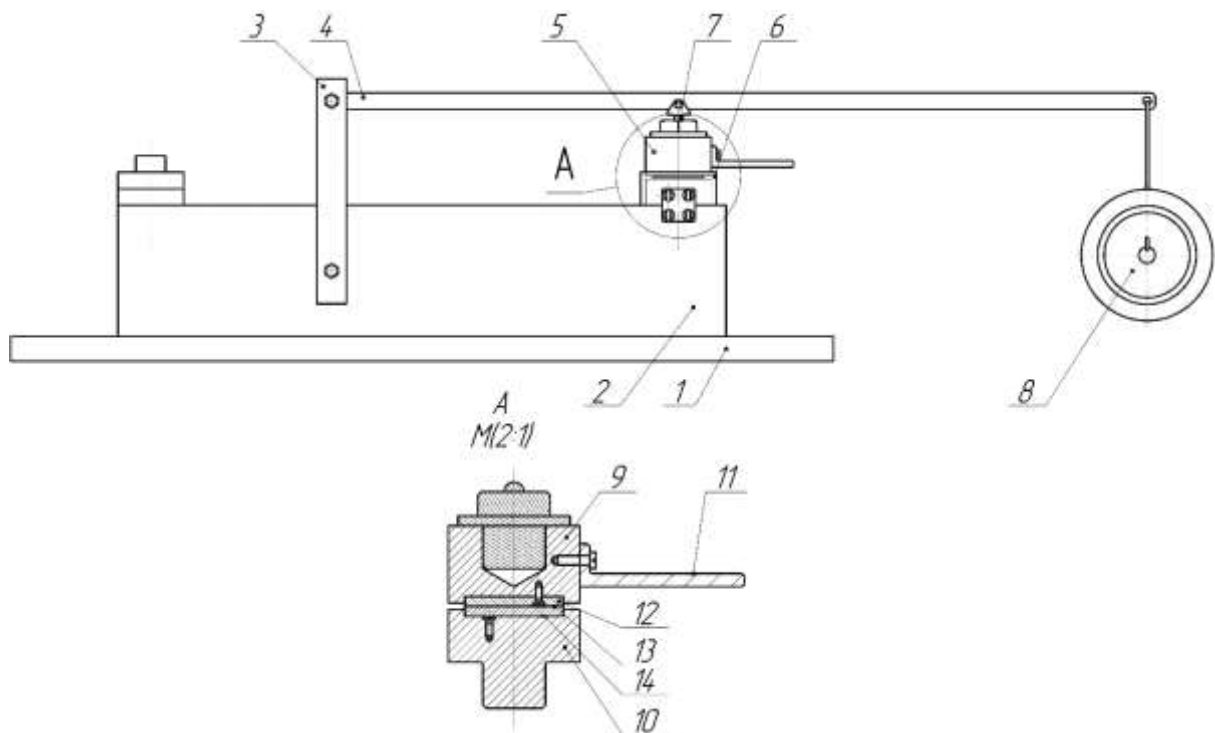


Рис. 1. Схема приспособления для исследования образцов на способность шаржирования абразива:

1 – плита; 2 – основа; 3 – стойка; 4 – плечо; 5 – устройство для закрепления образцов; 6 – кольцо; 7 – шарик для нагружения; 8 – груз; 9 – верхняя часть устройства закрепления; 10 – нижняя часть устройства закрепления; 11 – рукоятка; 12 – подвижный образец; 13 – свободный абразив; 14 – неподвижный образец

Конструкция разработана на основе работ Маслова Л.Н. [3]. Приспособление представляет собой плиту 1 (см. рис. 1), на которой закреплена основа 2. Устройство для закрепления образцов 5 крепится неподвижно к основе винтами. Это устройство состоит из двух частей: верхней 9 и нижней 10. Кольцо 6 служит для центрирования верхней части относительно нижней. Нагружение производится следующим образом (рис. 2): на конец плеча 4 навешивается груз 8, создавая усилие F_2 ; на устройство усилие F_1 передается через шарик 7 $\varnothing 5$ мм. Плечо соединяется со стойкой 3 посредством винтового соединения, но имеет возможность вращаться вокруг оси винта.

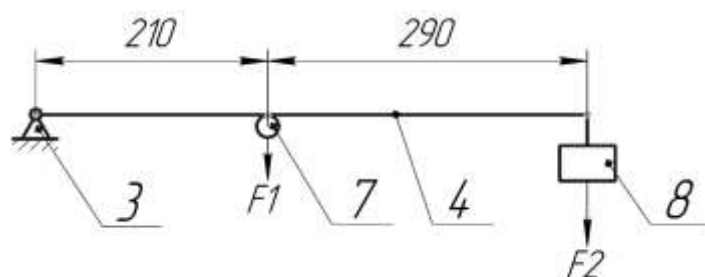


Рис. 2. Схема нагружения образцов в приспособлении для исследования образцов на способность шаржирования абразива

Работает приспособление следующим образом. Неподвижный образец 14 Ø20 мм изготавливался из исследуемых материалов, применяемых для изготовления притира. Подвижный образец 12 изготавливался из меди М1. Перед исследованием на шаржирование образцы притирались последовательно алмазными пастами зернистостью 40/28 и 20/14. Между исследуемыми материалами 14 и 12 помещался слой свободного абразива 13. Для всех опытов количество абразива оставалось постоянным. Взвешивание абразива производилось с помощью аналитических весов.

Давление на поверхности образцов выбиралось в соответствии с их величинами при правке. После приложения усилия верхний медный образец проворачивался с помощью рукоятки 11 на 360°, в соответствии с методикой определения шаржирования, предложенной в работе [4]. После снятия нагрузки образцы снимались и поворачивались для стряхивания нешаржированных зерен. Поверхности образцов исследовались с помощью микроскопа. По результатам исследования поверхностей образцов определялось количество внедренных в их поверхность зерен абразива (табл. 1, 2).

В качестве свободного абразива применялся порошок ККЧ марка 54С зернистостью F60 (0,3-0,25 мм), изготовленный на предприятии ПАО «Запорожский абразивный комбинат» [5]. Порошок ККЧ характеризуют высокая твердость, режущая способность, механическая прочность, химическая и термическая стойкость. ККЧ используется при обработке материалов высокой твердости и с низким сопротивлением разрыву.

Шлифовальные материалы ККЧ широко применяются при изготовлении абразивного инструмента со связанными абразивами: шлифовального, отрезного и полировального, инструмента на гибкой основе – шлифовальной шкурки, при шлифовании свободными абразивными зёрнами. Материалы ККЧ используются при обработке чугуна и цветных металлов, углерода, стекла и керамики, камня, железобетона, кирпича и шамота, древесины, пластмассы, кожи и резины, и других твердых, вязких, хрупких, сплавов и материалов искусственного и природного происхождения.

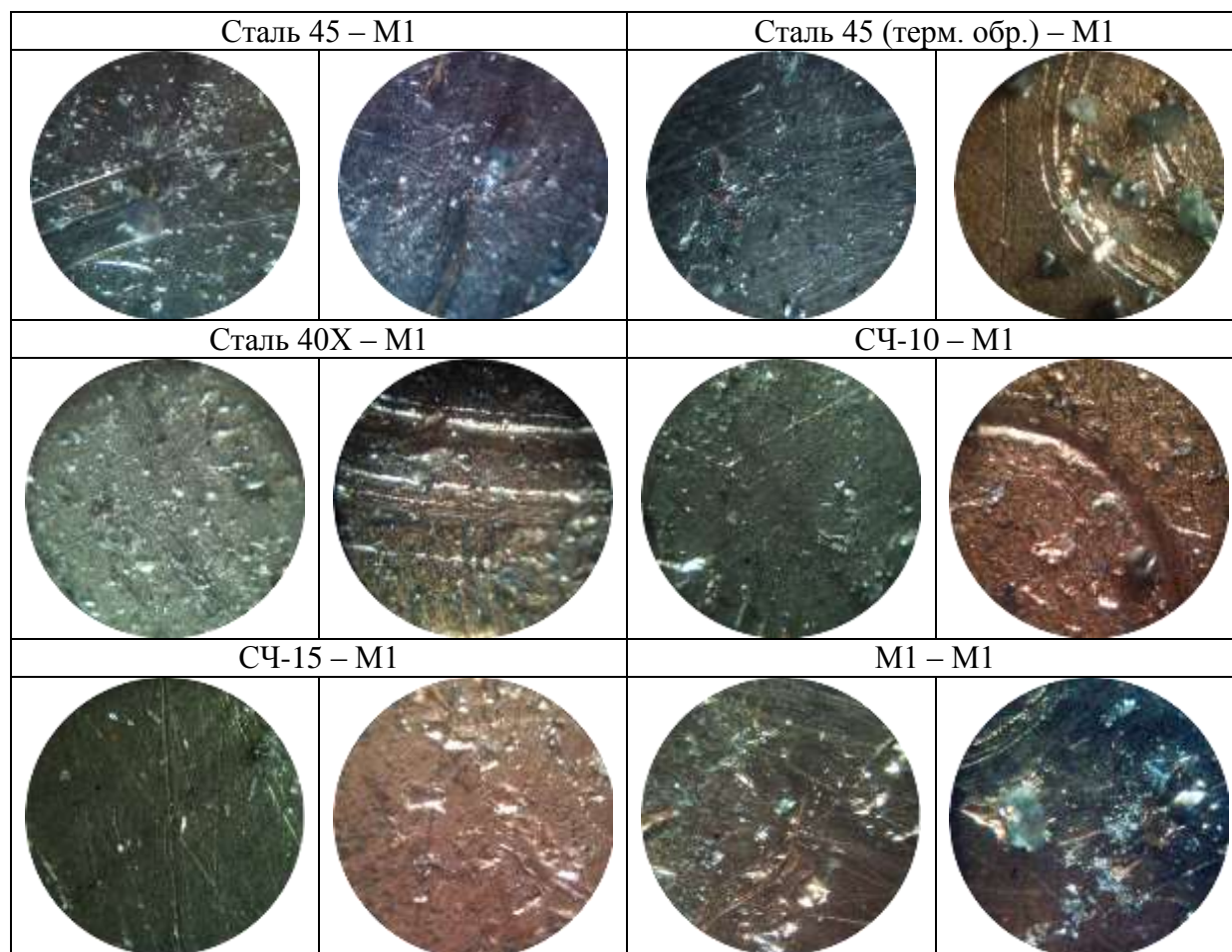
В качестве исследуемых материалов были выбраны:

1. М1;
2. СЧ-10;
3. СЧ-15;
4. Сталь 45;
5. Сталь 45 (закалка в масле с отпуском);
6. Сталь 40Х (закалка в масле с высоким отпуском).

Таблица 1. Результаты исследований образцов

Показатель	Ст. 45	Ст. 45 (т/обр.)	Ст. 40X	СЧ-10	СЧ-15	М1
Среднее число шаржированных зерен в одной точке	2,200	2,733	2,667	4,533	4,200	3,400
Среднеквадратическое отклонение	0,414	0,458	0,488	0,516	0,561	0,507
Коэфф. вариации V	18,820	16,747	18,298	11,39	13,348	14,914
Показатель точности исследований H , %	4,859	4,324	4,725	2,941	3,446	3,851
Дисперсия	0,171	0,210	0,238	0,267	0,314	
Точность	0,061	0,075	0,085	0,095	0,112	0,092

Таблица 2. Поверхность исследуемых образцов после нагружения



Вероятность шаржирования определялась по зависимости:

$$P = (n_{ср} S_{обр}) / (S_M \cdot n_n)$$

где где n_{cp} – среднее число шаржированных зерен в одной точке; $S_{обр}$ – площадь исследуемого образца; $S_{мк}$ – площадь, исследуемая в поле микроскопа; n_n – число зерен в навеске.

Влияние нагрузки на вероятность шаржирования абразивных зерен в поверхность образцов представлено на рис. 3. Зависимость вероятности шаржирования от нагрузки носит экстремальный характер. При увеличении силы до 65 Н доля зерен, которые разрушились в зоне контакта, возрастает, что и приводит к уменьшению вероятности шаржирования.

Корреляция между вероятностью шаржирования и твердостью составляет величину 0,832. Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов дает линейную зависимость вероятности шаржирования от твердости:

$$P_{ш} = 0,04 - 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot HB,$$

где HB – твердость материала по Бринеллю.

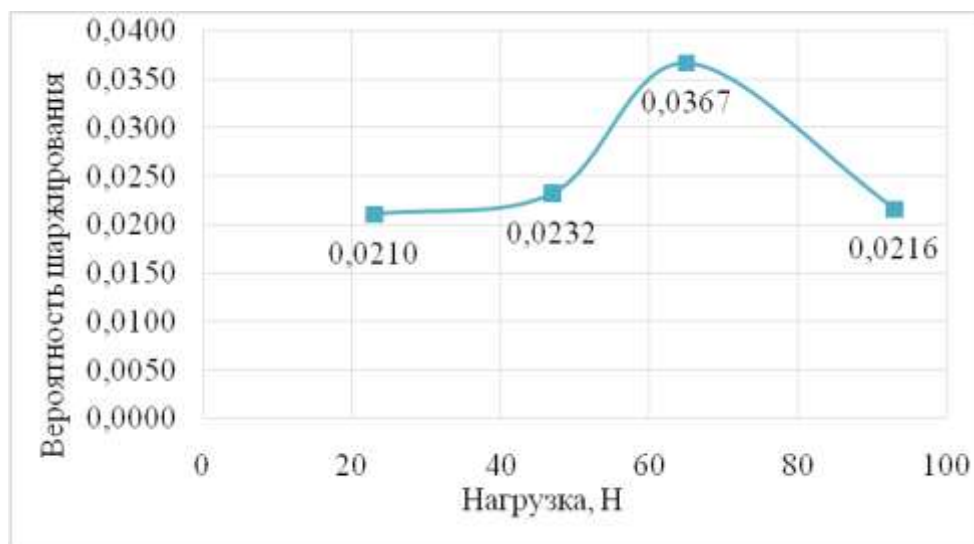


Рис. 3. Зависимость вероятности шаржирования образца из чугуна СЧ-10 от нагрузки

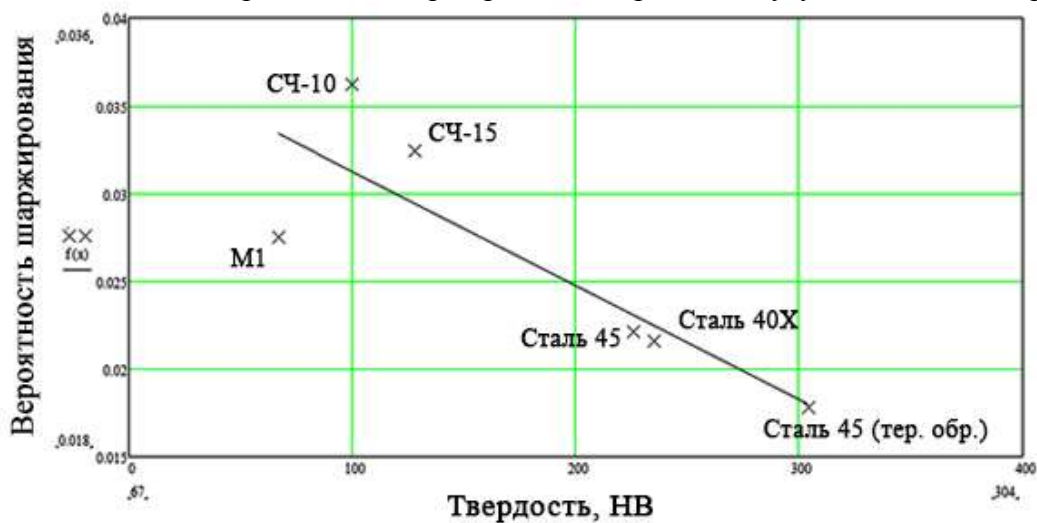


Рис. 4. Зависимость вероятности шаржирования от твердости образцов

Как видно из графика (рис. 4), с увеличением твердости вероятность шаржирования уменьшается. Материал М1 можно выбросить из общего числа, так как он представляет собой цветной металл, в отличие от остальных, и имеет иной характер шаржирования.

Результаты исследования показали, что вероятность шаржирования зерен в поверхность притира зависят от материала притира и силы, прикладываемой к притиру. Наибольшая вероятность шаржирования абразивных зерен в поверхность притира достигается при использовании в качестве притира чугуна серого СЧ-10.

2. Исследование влияния материала притира на процесс правки алмазного круга свободным абразивом

Для анализа влияния вероятности шаржирования абразивных зерен в поверхность притира воспользуемся программой, разработанной в ДонНТУ [6]. Как показано в работе, погрешность вычислений при определении высоты выступления зерен из связки круга при моделировании не превышает 10% от экспериментальных значений.

При моделировании оценивали зависимость выступления $\Delta R(\tau)$ алмазных зерен из связки круга 1А1 200x10x5x76 АС32 4-М2-01 от времени воздействия свободного абразива. В качестве абразива используем карбид кремния черный зернистостью F54. Скорость подачи притира и абразива при моделировании принималась постоянной соответственно равной 20 мкм/с и 250 мкм/с. При моделировании изменяли лишь вероятность шаржирования P в поверхность притира. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

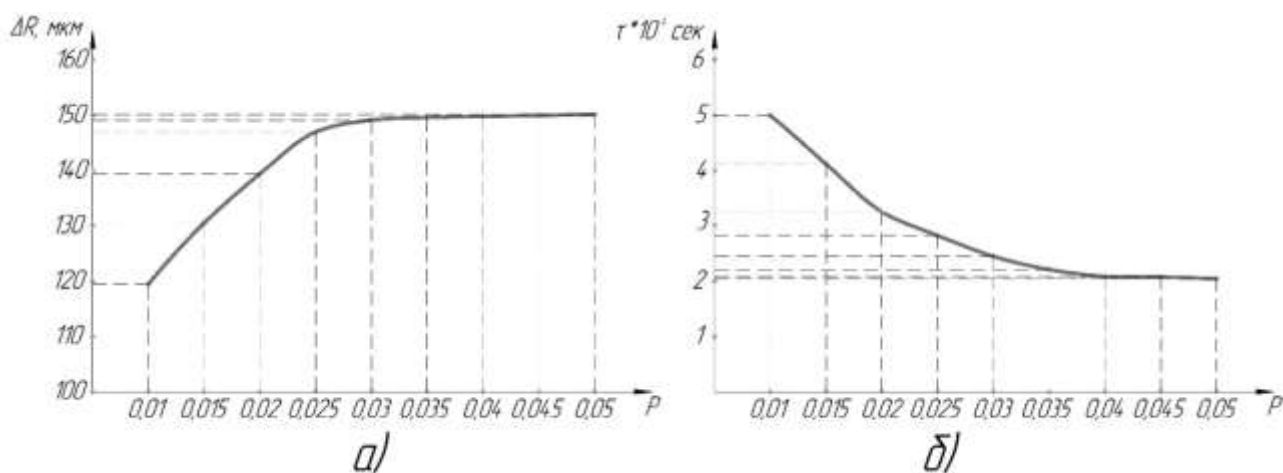


Рис. 5. Влияние вероятности шаржирования P зерен абразива в поверхность притира на:
а) предельную величину выступления зерен ΔR из вязки алмазного круга;
б) время процесса правки

Как видно из рис. 5, а, при увеличении вероятности шаржирования P с 0,01 до 0,03, величина выступления зерен ΔR увеличивается со 119 мкм до 148 мкм. Когда P принимает значение от 0,03 до 0,05, то ΔR практически не меняется и колеблется относительно значения 150 мкм.

Зависимость длительности процесса правки от вероятности шаржирования абразивных зерен в поверхность притира представлена на рис. 5, б. С увеличением вероятности шаржирования P от 0,01 до 0,04 время переходного процесса τ уменьшается с $5 \cdot 10^2$ сек до $2,2 \cdot 10^2$ сек. С увеличением вероятности шаржирования более 0,04 время правки

практически не изменяется. Таким образом, увеличение вероятности шаржирования свободного абразива в поверхность притира 0,01 до 0,04 позволяет увеличить выступание зерен из связки при правке на 25 % и сократить длительность процесса правки более чем в 2 раза.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что вероятность шаржирования абразива в материал зависит от материала притира. Применяя в качестве притира чугун серый марки СЧ-20 по сравнению со сталью 40Х можно увеличить вероятность шаржирования абразивных зерен в 1,5 раза.

2. Применяя при правке давления в зоне контакта притира с кругом, при которых не происходят разрушения зерен абразива, можно повысить эффективность процесса правки за счет повышения вероятности их шаржирования в поверхность притира.

3. Используя рациональные характеристики материала притира и давления в зоне его контакта с кругом можно повысить эффективность процесса правки алмазного круга свободным абразивом за счет увеличения выступания алмазных зерен из связки при сокращении длительности процесса правки.

Список литературы: 1. Библиотека машиностроителя. Керамика. Ее свойства и применение. – Режим доступа: <https://lib-bkm.ru/publ/26-1-0-1719>. 2. Попов, С.А. Шлифовальные работы / С.А. Попов. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с. 3. Маслов, Л.Н. Методика и результаты исследований способности шаржирования абразивом поверхности деталей после высокотемпературной термомеханической обработки / Л.Н. Маслов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1 (19). – С. 119-121. 4. Киселев, М.Г. Исследование особенностей поведения абразивных зерен при их внедрении в материал подложки при различных условиях нагружения / М.Г. Киселев, А.А. Новиков // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – Минск: Белорусский национальный университет. – 2005. – №4 (23). – С. 46-54. 5. ПАО «Запорожский абразивный комбинат». Электрокорунд нормальный (ЭН). – Режим доступа: <http://abrzp.ho.ua/index.shtml>. 6. Гусев, В.В. Теоретическое исследование механизма взаимодействия свободного абразива со связкой алмазного шлифовального круга при управлении состоянием его рабочей поверхности / В.В. Гусев, А.Л. Медведев // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – Вип. № 150. – С. 56-61.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦАНГОВОГО ПАТРОНА

Майданюк М.Р., Полтавец В.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

E-mail: mihailmaidanuk@mail.ru

Аннотация. В статье описаны зависимости параметров зажима цанговых зажимных патронов от отклонений диаметра заготовок, параметров цанг, различных вариантов разрезов и конструкций зажимных губок, а так же зависимость точности обработки детали от характеристик механизма зажима цанги. Рассмотрены условия взаимодействия зажимных цанг со шпинделем, корпусом патрона и заготовкой.

Ключевые слова: цанга, сила резания, зажим, жесткость, силовые характеристики.

Введение

Характеристики цангового патрона определяются параметрами зажимной цанги и условиями ее взаимодействия со шпинделем или корпусом патрона и заготовкой, величинами отклонений Δd диаметра d зажимаемой заготовки от диаметра рабочего отверстия цанги d_0 ($\Delta d = d - d_0$), а также силами зажима [1].

Основная часть

1 Влияние точности заготовки на силу зажима

Колебания силовых характеристик всего механизма зажима определяются результирующими отклонениями силовых характеристик как привода, так и патрона. Графики характеристик зажимных патронов с затяжными цангами, приведенные на рис. 1, получены на основании испытаний пяти токарно-револьверных станков 1341 при постоянной осевой силе S_z затяжки цанг, создаваемой гидроцилиндром при давлении масла $p = 1,2$ МПа, и различных величинах отклонений диаметра заготовок от диаметра рабочего отверстия цанги Δd . Жесткость j зависит от отношения радиальной силы P_p , приложенной на расстоянии l от торца цанги к зажатой оправке, к величине отжима в направлении действия этой силы. Суммарную радиальную силу зажима T_z измеряли цанговым динамометром.

Анализ полученных зависимостей показал, что по мере увеличения Δd увеличивается жесткость j , сила зажима T_z и величина оттягивания Δ_0 заготовки при зажиме, а радиальное биение Δ_r зажатой оправки (на определенном расстоянии от торца цанги) уменьшается [2].

Результаты экспериментальных исследований радиальной жесткости и точности зажима заготовок различного диаметра в патроне с затяжной цангой и геометрическим замыканием показали, что между радиальной жесткостью зажима заготовки и радиальной точностью существует нелинейная неоднозначная взаимосвязь (рис. 2). Так, при отрицательных отклонениях диаметра зажимаемой заготовки при уменьшении радиальной жесткости радиальная точность растёт, а при положительных отклонениях диаметра заготовки радиальная жесткость и радиальная точность изменяются в одном и том же направлении, причём изменение радиальной точности существенно меньше имеющего место при отрицательных отклонениях диаметра заготовки [3].

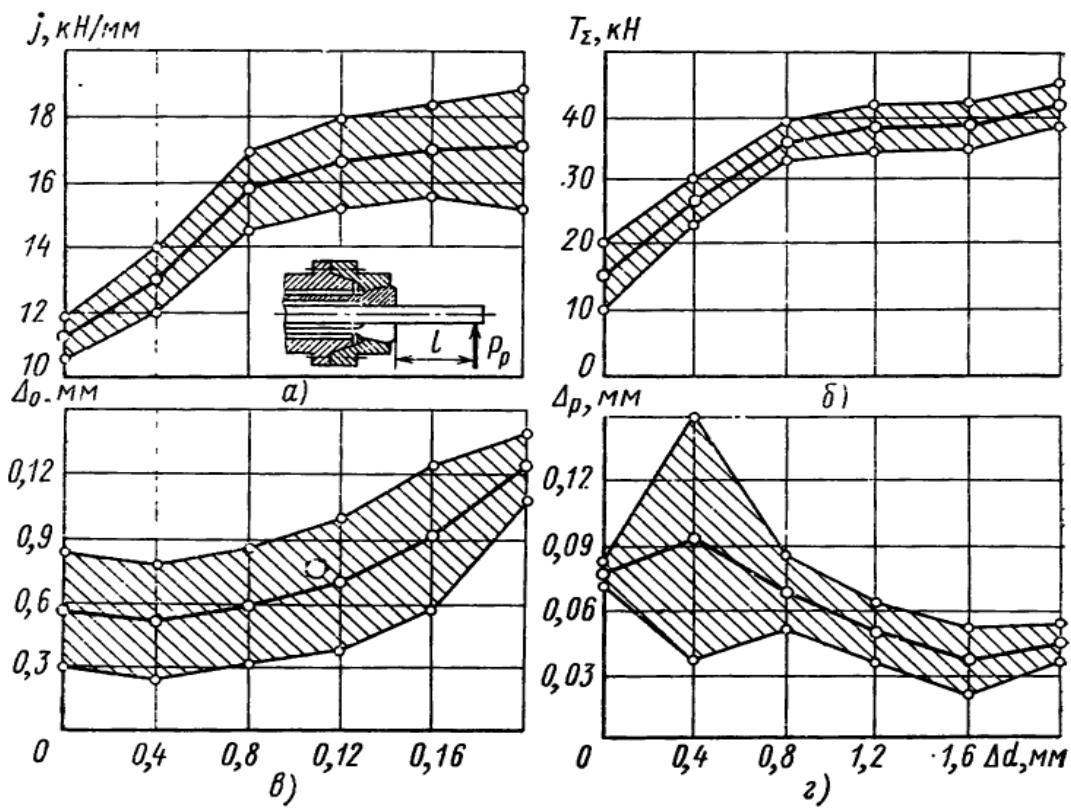


Рис. 1. Зависимости силовых характеристик механизма зажима от отклонений диаметра заготовки при $l=100$ мм и $P_p = 7,5$ кН [3]

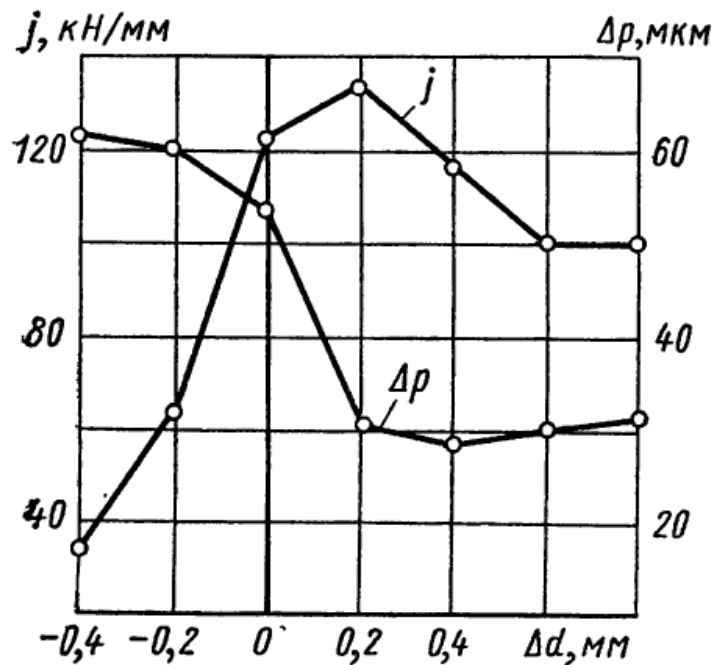


Рис. 2. Зависимость жесткости и точности зажима от отклонений диаметра заготовки [3]

2 Влияние характеристик механизма зажима на точность обработки

С увеличением жесткости зажима радиальные биения Δ_r уменьшаются, причем заметнее при увеличении диаметра прутка [4]. При закреплении прутка, диаметр которого несколько выше диаметра рабочего отверстия цанги, жесткость и радиальная точность оказываются максимальными, так как в этом случае обеспечивается наиболее полный контакт цанги со шпинделем и заготовкой. Точность зажима прутка по диаметру при $d < d_0$ ниже, потому что контактирование цанги со шпинделем происходит по краям губки (у прорезей). В результате этого основным фактором, влияющим на точность закрепления, становится неточность изготовления цанги (рис. 3), в частности, неточность разрезки по углу.

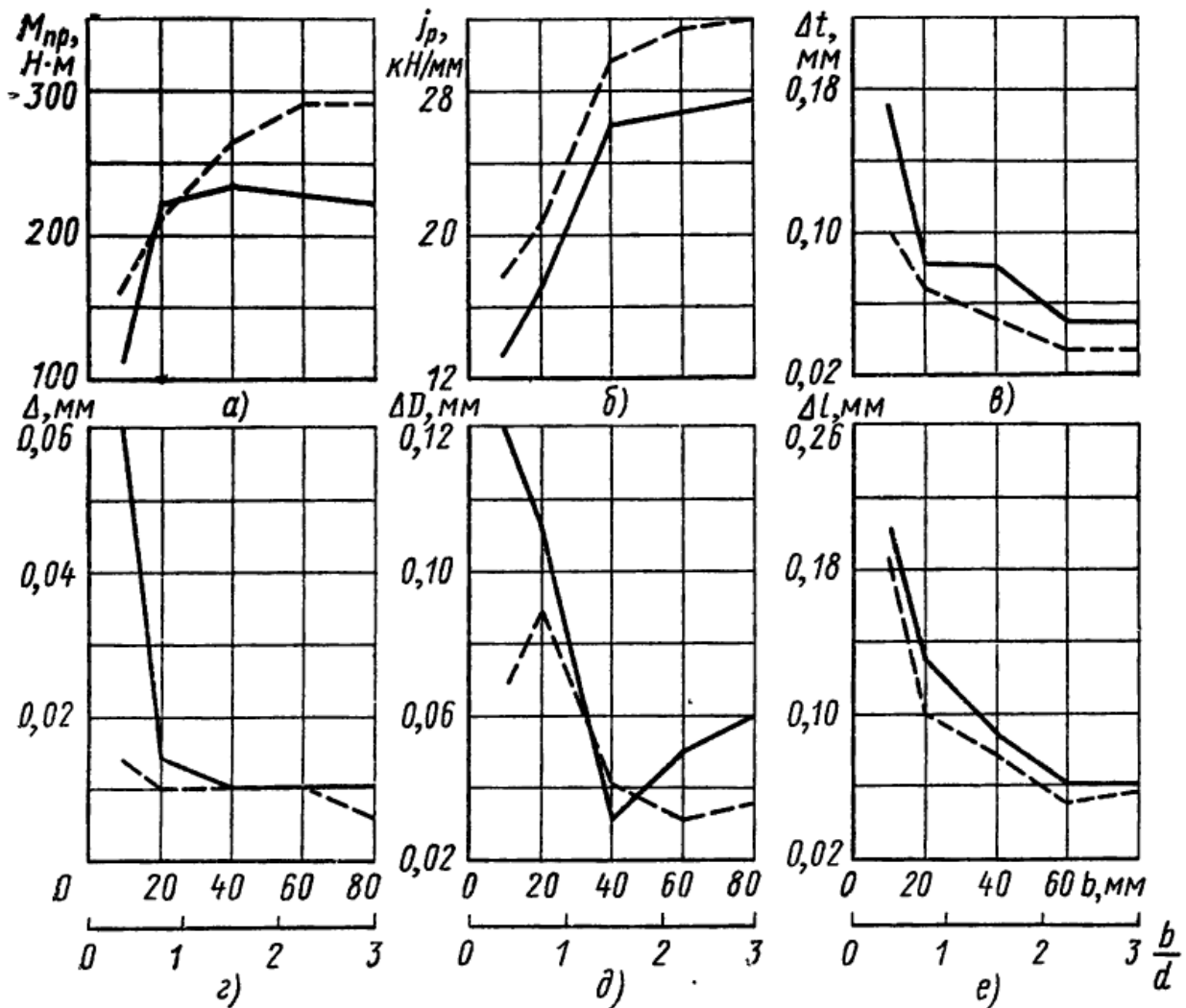


Рис. 3. Зависимость точности обработки деталей от характеристик механизма зажима:
 — $p = 1,2$ МПа; ---- $p = 2,0$ МПа [3]

Анализ размеров обработки партии ступенчатых деталей с просверленным отверстием (см. рис. 3) показал влияние характеристик механизма зажима и, в частности, силы зажима (момента прокручивания M_{np}) и радиальной жесткости j_p цангового патрона, на точность обработки (см. рис. 3, а, б). Исследования были проведены при различных силах зажима (изменением давления масла p), диаметрах прутка d (27 и 28 мм), частотах враще-

ния шпинделя n и длинах губки (базы зажима) b . После обработки измеряли: разностенность Δt , как разность максимальной и минимальной толщины стенок в начале отверстия детали (см. рис. 3, в); некруглость Δ , как разность минимального и максимального диаметров в одном сечении (см. рис. 3, г); отклонения ΔD от номинального значения среднего диаметра проточенного участка детали (см. рис. 3, д); отклонение длин деталей Δl от длины, настроенной упором (см. рис. 3, е) [3].

Некруглость, разностенность, отклонения диаметров и длин деталей от номинала (см. рис. 3, в-е) с увеличением базы зажима b уменьшаются, а момент прокручивания M_{np} (см. рис. 3, а) и жесткость j (см. рис. 3, б) увеличиваются. С увеличением базы в 4 раза (от 10 мм до 40 мм) некруглость деталей уменьшается в 6 раз, при этом жесткость закрепления заготовки увеличивается в 2 раза (см. рис. 3, б).

При дальнейшем увеличении базы зажима некруглость остается постоянной (см. рис. 3, г), так как жесткость увеличивается незначительно (от 26 до 28 кН/мм). Разностенность Δt и отклонения длин Δl деталей уменьшаются в 2 раза. При малой базе зажима и повышении частоты вращения шпинделя разностенность деталей увеличивается. Это объясняется тем, что при больших частотах вращения прутков под действием центробежных сил прогибается внутри шпинделя и из-за недостаточной жесткости участка закрепления при малой базе зажима биение наружного конца детали становится больше.

При сверлении сверло уводит тем больше, чем больше частота вращения прутка и его биение, и, следовательно, разностенность увеличивается. При увеличении базы зажима разностенность деталей для различных частот вращения прутка примерно одинакова [5].

Отклонения длины Δl деталей (см. рис. 3, е) при уменьшении базы зажима увеличиваются. Это объясняется тем, что при малой базе зажима возрастают удельные давления на пруток, вызывающие дополнительные упругопластические деформации, в результате чего губки цанги сильнее врезаются в пруток, сама цанга с прутком дополнительно затягивается в шпиндель, и оттягивание прутка возрастает [6].

3 Влияние параметров цанг на характеристики зажима

С увеличением числа лепестков более трех сила зажима в меньшей степени зависит от отклонений Δd диаметра прутка (рис. 4, а); величина ее возрастает, так как уменьшаются потери на деформацию лепестков и уменьшается угол контакта губки со шпинделем, что очень важно при $\Delta d \leq 0$. Стабильность жесткости зажима увеличивается с уменьшением жесткости лепестков, что при определенной длине цанги может быть достигнуто увеличением числа разрезов [3].

Величина оттягивания Δ_0 (рис. 4, б) заготовки в цанговом патроне с затяжной цангой увеличивается с увеличением отклонения ее диаметра и притом значительно при увеличении рабочей части губки b . В то же время радиальные биения Δ_p и конусность (то же самое, разность показаний биений И1 – И2) уменьшаются (рис. 4, в).

С увеличением угла контакта $2\beta_0$ цанги со шпинделем радиальная сила зажима T_z (или коэффициент усиления K_z) уменьшается (рис. 4, г) и притом значительно для прутков, диаметр которых равен или несколько больше диаметра рабочего отверстия цанги (заштрихованная зона) [2].

С увеличением длины лепестка заметно возрастают сила и жесткость зажима и уменьшается величина оттягивания прутка (рис. 4, д). Длину лепестка целесообразно увеличивать до некоторого предела, который, например для трехлепестковых цанг, составляет примерно полторы-две длины губки. При большей длине лепестка можно зажимать прутки с большими отклонениями диаметра. Измерения жесткости зажима j показали, что

с увеличением длины лепестка жесткость затяжных цанг сначала увеличивается до определенного предела, а затем начинает уменьшаться. Объясняется это уменьшением сопротивления лепестков с уменьшением их жесткости при повороте заготовки в цанге вследствие поворота губок [4].

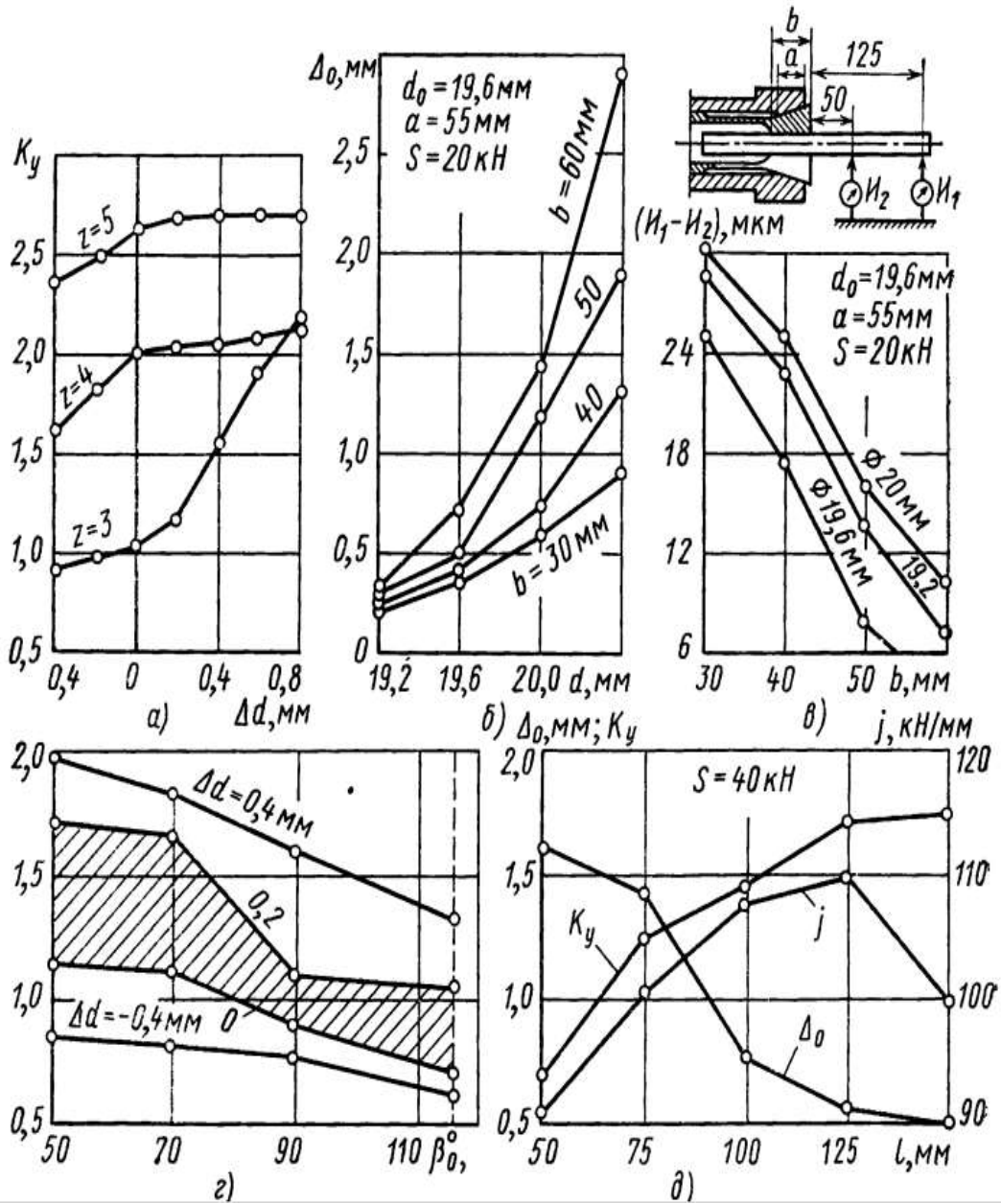


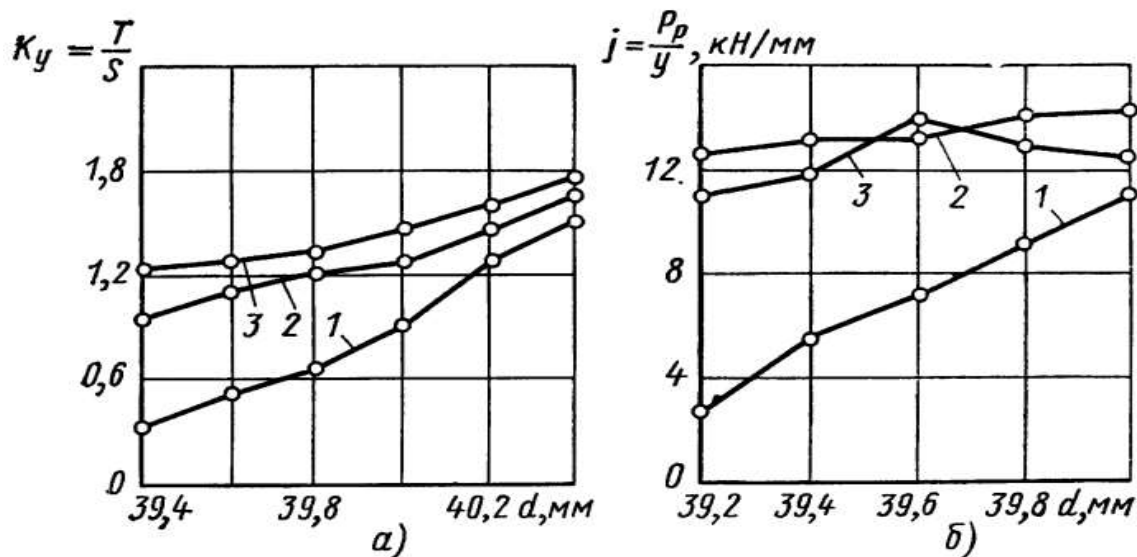
Рис. 4. Зависимости характеристик зажима от параметров цанги [3]

4 Влияние вариантов разрезов упругой части губок на характеристики зажима

Для исследования влияния дополнительных надрезов были проведены эксперименты с цангой к токарному автомату 1А240-6. Изменяя форму и число разрезов, сравнивали силовые и жесткостные характеристики цанг по трем вариантам (рис. 5) [5].

С увеличением диаметра зажимаемой заготовки d растет коэффициент усиления K_y и жесткость j , однако более стабильной и более высокой оказалась жесткость у цанги с

дополнительными надрезами в губке (рис. 5, б, кривая 2), несмотря на то, что коэффициент K_y , оказался несколько ниже, чем у шестилепестковой цанги (рис. 5, а).



Ри

с. 5. Характеристики зажима заготовок цангами с различными вариантами разреза упругой части и губки [5]

1 – цанга с 3-мя лепестками; 2 – цанга с дополнительными надрезами; 3 – цанга с 6-ю лепестками

Выводы

1. Взаимосвязь между радиальной жесткостью зажима и радиальной точностью обработки имеет нелинейный неоднозначный характер.

2. Влияние характеристик механизма зажима на точность обработки имеет экспоненциальный характер и при больших длинах базы зажима, значительно превышающих диаметр зажимного прутка, это влияние нивелируется.

3. Рациональная, по отношению к характеристикам зажима, длина лепестка, для 3-х лепестковых цанг составляет 1,5 - 2,0 базы зажима (длины губки).

4. Увеличение количества лепестков цанги ведет к повышению ее силовых и жесткостных характеристик. Примерно тех же результатов можно добиться, оснащая цанги дополнительными надрезами.

Список литературы: 1. Кузнецов, Ю.Н. Комплексная проверка цанговых механизмов зажима / Ю.Н. Кузнецов, М.Л. Орликов, В.А. Красуцкий // Технология и организация производства. – 1970. – № 2. – С. 55-57. 2. Кузнецов, Ю.Н. Расчет угла контакта зажимной цанги со шпинделем / Ю.Н. Кузнецов // Станки и инструмент. – 1970. – № 8. – С. 20-22. 3. Кузнецов, Ю.Н. Экспериментальное исследование влияния конструктивных элементов зажимных цанг на их характеристики / Ю.Н. Кузнецов, М.Л. Орликов // Технология и автоматизация машиностроения. – 1973. – Вып. 11. – С. 41-45. 4. Кузнецов, Ю.Н. Жесткость лепестков цанг / Ю.Н. Кузнецов, М.Л. Орликов // Станки и инструмент. – 1968. – № 3. – С. 39-42. 5. Кузнецов, Ю.Н. Проектирование зажимных механизмов автоматизированных станков / Ю.Н. Кузнецов, М.Л. Орликов. – М.: Машиностроение, 1977. – 140 с. 6. Кузнецов, Ю.Н. Передача сил в патроне с цилиндрической цангой / Ю.Н. Кузнецов, Я.В. Божко // Технология и автоматизация машиностроения. – 1974. – Вып. 13. – С. 55-64.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ОТВЕРСТИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Макаренко Р.И., Молчанов А.Д., Гусев В.В.
(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация. В статье показано влияние режимов магнитно-абразивного полирования на параметр шероховатости Ra и длительность обработки внутренних отверстий деталей из оксидной керамики, а также найден оптимальный режим обработки с целью обеспечения требуемого значения шероховатости за минимальное время обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, параметр шероховатости, режим обработки, поверхность отклика.

Введение

Керамические материалы наряду с высокой твердостью, как правило, имеют повышенную хрупкость, низкое сопротивление изгибу и ударным нагрузкам. Среди современных керамических материалов один из самых распространенных – оксид алюминия – находит самое широкое применение. Основные свойства материала: очень высокая прочность, высокая твердость, стабильность при высоких температурах, высокая износостойчивость, высокое сопротивление коррозии, даже при высоких температурах, высокая теплопроводность, устойчивость к агрессивным средам.

Одним из методов улучшения микрорельефа поверхностного слоя является магнитно-абразивное полирование (МАП), являющееся разновидностью магнитно-абразивной обработки. Магнитно-абразивная обработка (МАО) – это обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле.

В процессе обработки порошковая ферромагнитная абразивная масса, под действием энергии магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь. Во время обработки происходит удаление припуска абразивным способом с созданием магнитного поля непосредственно в зоне резания. В зависимости от схемы МАО роль магнитного поля заключается: в формировании из магнитно-абразивного порошка абразивного инструмента (АИ) и в удерживании этого порошка в зоне резания; в придании АИ или заготовке рабочих движений; в создании сил резания [1].

При движении заготовки через рабочую зону порошок оказывает давление на деталь в каждой точке поверхности, что приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей. Он обеспечивает получение параметров шероховатости Ra 0,01-1 мкм, снижение волнистости в 8-10 раз, гранности до 2 раз. При этом повышается контактная прочность и износостойкость деталей в 2-3 раза, увеличивается опорная длина профиля до 75-85 % [2].

Целью данной работы является нахождение оптимального режима обработки (скоростей заготовки и инструмента) технической керамики из оксида алюминия Al_2O_3 методом магнитно-абразивного полирования, при которых будет получено требуемое значение шероховатости обрабатываемой поверхности при уменьшении времени обработки.

Основная часть

На кафедре «Мехатронные системы машиностроительного оборудования» ДонНТУ разработано устройство на базе токарно-револьверного станка 1341, позволяющее выполнять магнитно-абразивное полирование деталей из керамики.

Обрабатываемый образец представляет собой втулку, изготовленную из керамики Al_2O_3 . Втулка $\varnothing 20$ мм предварительно обрабатывалась с помощью алмазного шлифовального круга 1A1 100×50×20 AC4 125/100 100 M2-01 ГОСТ 16167-90 для обеспечения необходимой предварительной шероховатости $Ra = 2,5 \pm 0,2$ мкм и обеспечения геометрической точности в соответствии с тем, как это происходит на данный момент в промышленности.

Для реализации MAO была выбрана схема обработки с постоянными магнитами в виде колец, которые устанавливались противоположно заряженными полюсами по отношению друг к другу на оправке 2 (рис. 1). Четыре магнитных неодимовых кольца расположены по отношению друг к другу противоположной полярностью и обеспечивают суммарную магнитную индукцию 0,8 Тл.

Магниты направлены противоположной полярностью и между ними находится магнитопровод. Вся эта конструкция соединяется со шпинделем приспособления.

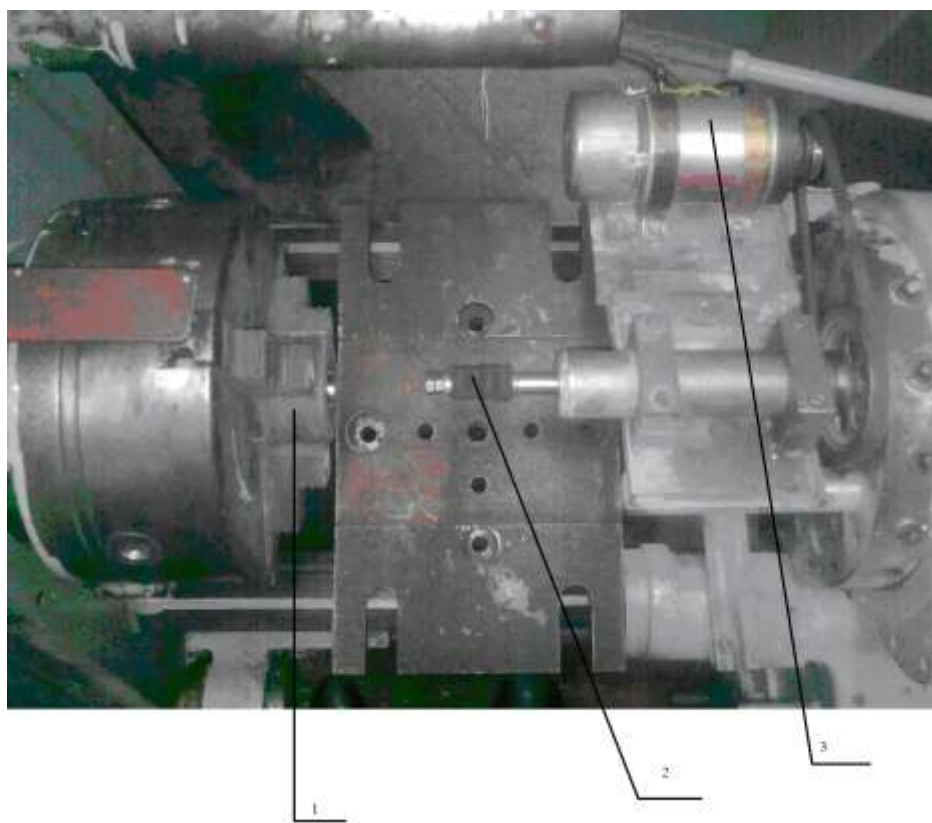


Рис. 1. Общий вид приспособления для магнитно-абразивной обработки

Каждый стальной магнитопровод при этом пропускает через себя ток, созданный двумя соседними магнитами. Нижние плоскости магнитопроводов с чередующейся полярностью являются магнитными полюсами на рабочей поверхности индуктора, обращенной к заготовке 1. Магнитно-абразивный порошок удерживается на рабочей поверхности индуктора, образуя тем самым своеобразную «магнитную кисть», которая при сообщении скорости главного движения шпинделя базового станка осуществляет процесс полировки поверхности образца [3].

В качестве магнитно-абразивного порошка использовали железно-абразивный порошок с синтетическим алмазом в виде абразивных включений производства НТЦ «Электрон», г. Донецк. Размер фракции порошка 180/100, размер абразива 7/5, содержание абразива в зерне 40 %. Магнитно-абразивный порошок удерживается на рабочей поверхности индуктора, создавая своеобразную магнитную щетку. Вращение оправки осуществляется от регулируемого двигателя постоянного тока 3 (см. рис. 1) с частотой от 1000 до 2500 об/мин, обеспечивая скорость резания микропорошком V_p . Кроме этого при МАО оправке сообщается постоянное возвратно-поступательное движение относительно заготовки, которая вращается с частотой n и обеспечивает скорость заготовки.

В результате обработки результатов эксперимента были получены регрессионные зависимости влияния режимов полирования на параметр шероховатости Ra (1) и время обработки (2):

$$Ra = 0,58 \cdot V_{\partial}^{-3,14-1,3 \ln(v_{\partial})} \cdot V_u^{-1,46+0,88 \ln(v_u)}; \quad (1)$$

$$\tau = 4,48 \cdot V_{\partial}^{1,22+0,83 \ln(V_{\partial})+2,46 \ln(V_u)} \cdot V_u^{3,77+0,313 \ln(V_u)}. \quad (2)$$

Для анализа влияния режимов обработки на формирование микрорельефа были получены поверхности отклика (рис. 2).

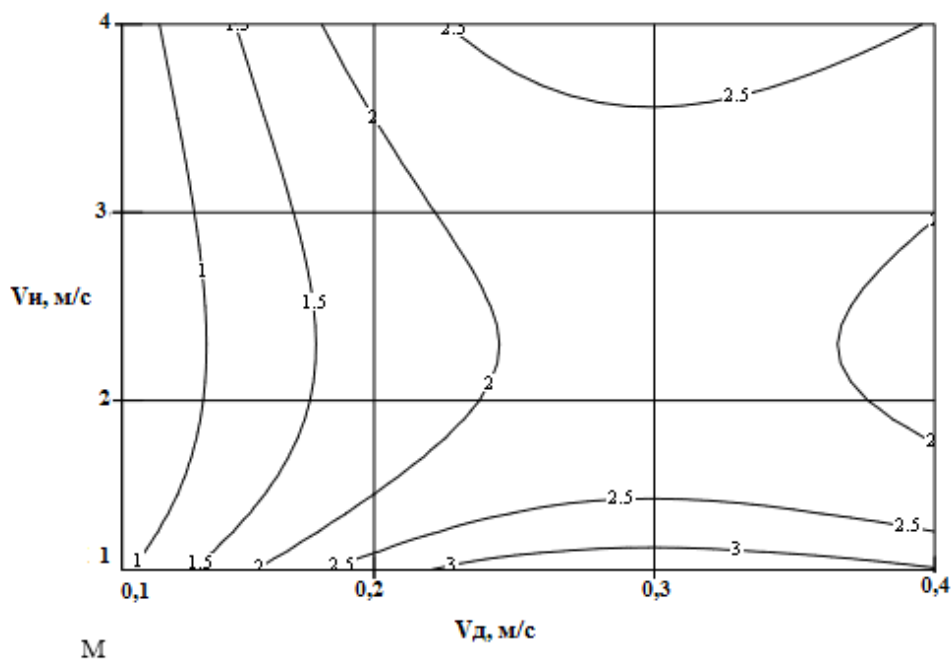


Рис. 2. Уровни поверхности отклика влияния скоростей инструмента и заготовки на формирование микрорельефа по критерию Ra поверхности керамики Al_2O_3

Из рис. 2 видно, что с увеличением скорости вращения заготовки параметр шероховатости Ra увеличивается. С увеличением скорости инструмента, шероховатость вначале уменьшается, а потом увеличивается, что говорит о нелинейном характере влияния скорости инструмента на шероховатость поверхности.

При больших значениях скорости заготовки (больше 0,2 м/с), шероховатость не улучшается, что связано с тем, что во время обработки технической керамики под воздействием МАИ происходят сколы обрабатываемого материала, что может быть обусловлено

усталостными процессами при разрушении керамики зернами МАИ. При скоростях вращения детали более 0,3 м/с, значение параметра шероховатости Ra превышает исходные значения.

На фотографии (рис. 3) показаны сколы материала на поверхности детали из керамики, которые являются причиной нелинейности формирования высотных параметров микрорельефа. Фотографии были получены с помощью микроскопа BRESSER Biolux LCD 40-1600x.

Как показали результаты исследования, наименьшие значения шероховатости находятся за границей исследуемых параметров.

Таким образом, следует рекомендовать следующие значения скоростей: скорость заготовки $V_d < 0,15$ м/с, а скорость инструмента V_u в пределах от 2 до 3 м/с.

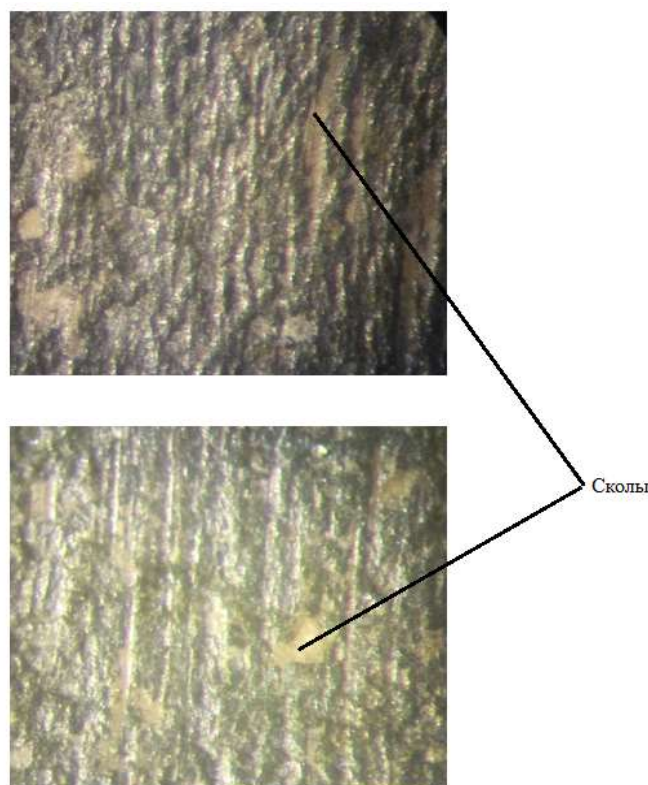


Рис. 3. Сколы поверхностного слоя керамики Al_2O_3 после МАП

Для выбора наилучшего времени обработки, при котором будет получено минимальное значение параметра шероховатости Ra , были получены поверхности отклика влияния режимов обработки на время обработки (рис. 4).

Из графика на рис. 4 можно увидеть, что при скоростях заготовки больше, чем 0,25 м/с и инструмента выше 2,5 м/с длительность полирования резко возрастает. Длительность обработки также возрастает при малых скоростях $V_u < 1,5$ м/с и $V_d < 0,15$ м/с.

Для интенсификации процесса полирования желательно выбирать скорости заготовки менее 0,15 м/с, при скоростях инструмента более 2 м/с. При малых скоростях инструмента $V_u < 1,5$ и скорости заготовки более 0,2 м/с также достигается минимальное время полирования, но из графика на рис. 2 видно, что в этой области значения шероховатости являются неприемлемыми для данного вида обработки, поэтому использование данных режимов не рекомендуется.

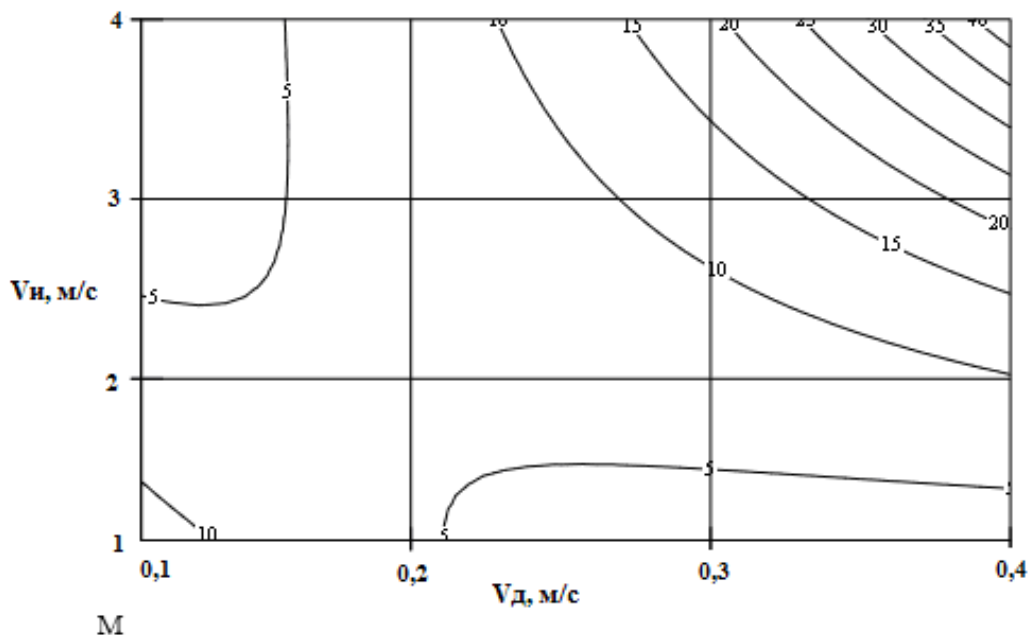


Рис. 4. Уровни поверхности отклика влияния режимов обработки на длительность МАП

Аналогично с графиком влияния скоростей инструмента и детали на формирование микрорельефа (рис. 2), минимумы функции на графике влияния режимов обработки на время обработки (рис. 4), находятся за границами области исследуемых параметров. Таким образом, для выбора оптимальных режимов обработки будет использован аддитивный критерий.

Для поиска оптимальных значений обработки предложено использовать аддитивный критерий, который учитывает влияния режимов обработки на шероховатость обрабатываемой поверхности и длительности обработки одновременно.

В аддитивных критериях целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев. Частные критерии имеют различную физическую природу и в соответствии с этим различную размерность. Поэтому при образовании обобщенного критерия оперируют не с натуральными критериями, а с их нормированными значениями. Нормированные критерии представляют собой отношение натурального частного критерия к некоторой нормирующей величине, измеряемой в тех же единицах, что и сам критерий.

В общем виде уравнение с использованием аддитивного критерия имеет вид:

$$Ko = k_1 \cdot Ra + k_2 \cdot \tau, \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты аддитивного критерия, сумма которых должна быть равна 1.

В качестве коэффициентов аддитивного критерия были подобраны следующие коэффициенты:

Для влияния скоростей инструмента и заготовки на формирование микрорельефа поверхностного слоя весовой коэффициент составил 0,8, соответственно для влияния времени магнитно-абразивной обработки на параметр шероховатости поверхностного слоя, коэффициент был равен 0,2. Такие коэффициенты обусловлены тем, что при абсолютных значениях величина времени полирования в 4-5 раз больше требуемых значений величины среднеарифметического отклонения профиля.

Полученное уравнение с использованием аддитивных критериев имеет вид:

$$Ko = 0,8 \cdot \left[0,58 \cdot V_{\delta}^{-3,14-1,3 \ln(V_{\delta})} \cdot V_u^{-1,46+0,88 \ln(V_{\delta})} \right] + 0,2 \cdot \left[4,48 \cdot V_{\delta}^{1,22+0,83 \ln(V_{\delta})+2,46 \ln(V_u)} \cdot V_u^{3,77+0,313 \ln(V_u)} \right] \quad (4)$$

В качестве ограничивающего фактора на выбор режимов полирования был принят параметр шероховатости Ra , значение которого после полирования не должно превышать 1 мкм. Область значений, в которых значение параметра шероховатости Ra не превышает 1 мкм, обозначена штриховкой на рис. 5. Именно в этой области и должны быть найдены оптимальные режимы обработки.

Полученный при использовании аддитивного критерия график представлен на рис. 5.

Полученные абсолютные минимальные значения параметра оптимизации находятся за границей исследуемых параметров. Т.о. оптимальные значения берем на границе области исследуемых параметров, которые находятся в точке К, которая соответствует скорости инструмента $V_u = 3$ м/с и скорости вращения заготовки $V_{\delta} = 0,1$ м/с.

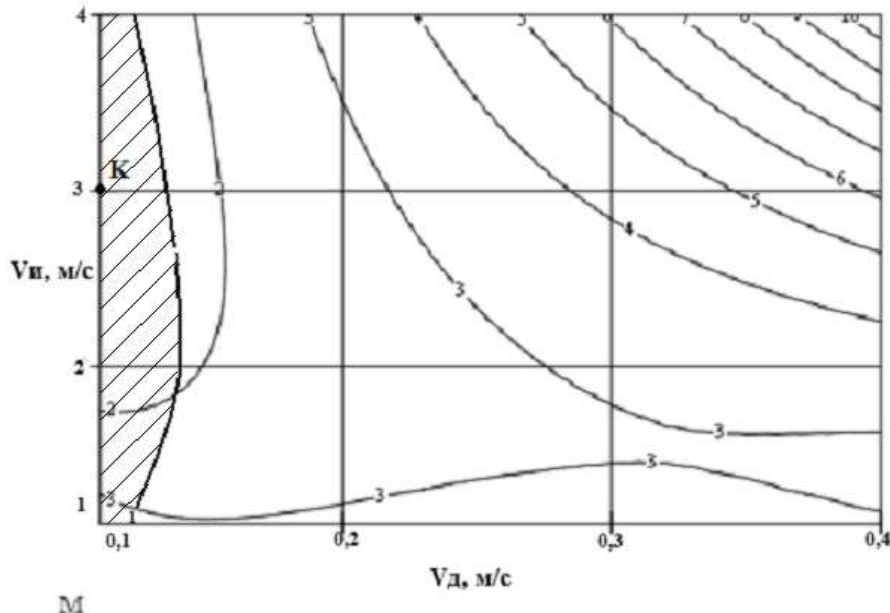


Рис. 5 Уровни поверхности отклика при использовании аддитивного критерия оптимизации

Подставляя найденные значения режимов обработки в уравнение регрессии (1) получаем значение параметра шероховатости $Ra = 0,473$ мкм. Аналогично подставляя значе-

ния режимов обработки в уравнение регрессии (2), получаем время обработки, равное 4 минутам.

Выводы

1. Даны рекомендации по выбору скоростей инструмента и заготовки при магнитно-абразивной обработке с целью получения минимального значения параметра шероховатости и времени обработки.

2. Для выбора оптимальных режимов обработки был использован аддитивный критерий, который учитывал влияния режимов обработки на шероховатость обрабатываемой поверхности и длительность обработки одновременно.

3. Определён оптимальный режим обработки оксидной керамики при МАП, который достигается при скорости инструмента $V_u = 3$ м/с и скорость вращения заготовки $V_d = 0,1$ м/с.

Список литературы: 1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с. 2. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с. 3. Гусев, В.В. Влияние режимов магнитно-абразивной обработки на параметры шероховатости изделий из керамики / В.В. Гусев, Е.С. Сухоручко // Инженер. Студентський науково-технічний журнал. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – № 12. – С. 45-48.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И СТОЙКОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЖ

Мосеров К.Н., Полтавец В.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

***Аннотация.** В статье анализируются существующие направления повышения эффективности применения смазочно-охлаждающей жидкости. Выполнен обзор возможных способов подачи СОЖ в зону резания, влияющих на работоспособность и стойкость шлифовального инструмента.*

***Ключевые слова:** смазочно-охлаждающая жидкость, струя, шлифование, стружка.*

Введение

При обработке металлов резанием применяются смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Среди всех СОТС наиболее распространенным видом являются жидкие (СОЖ).

Показатели качества поверхностного слоя деталей машин, определяющие их эксплуатационные характеристики, в большинстве случаев формируются при шлифовании. Этот процесс характеризуется высокой тепловой напряженностью и большой вероятностью появления в поверхностных слоях шлифованных деталей дефектов в виде прижогов и микротрещин, снижающих их эксплуатационные свойства. Одним из путей снижения тепловой напряженности процесса шлифования и улучшения качества шлифованных деталей является применение эффективных составов смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), их активизация и использование рациональных способов подачи в зону резания [1].

В процессе резания охлаждающая жидкость производит смазочное, охлаждающее, моющее действия. В результате смазывания уменьшаются силы трения, снижается тепловыделение и повышается стойкость режущего инструмента. Охлаждающее действие СОЖ заключается в отводе теплоты от нагретых контактных площадок режущего инструмента и стружки. Моющее действие выражено в вымывании из зоны резания твердых частиц карбидов, мелкой стружки и неметаллических включений [2].

Одним из важных требований к СОЖ является обеспечение увеличения стойкости режущего инструмента и повышение качества обрабатываемой поверхности при соблюдении заданной точности обработанной поверхности [2].

Основная часть

1. Организационное направление.

Эффективность применения смазочно-охлаждающих жидкостей в механообрабатывающих производствах определяется не только оптимальным компонентным составом СОЖ, но и рациональной организацией систем ее эксплуатации вспомогательными службами цехов и заводов машиностроительных отраслей. Ни одно машиностроительное предприятие не обходится без службы СОЖ, выполняющей соответствующие процессно-аппаратурные функции приготовления и активации рабочих растворов, подготовки оборудования, систем циркуляции, транспортирования, очистки, регенерации, утилизации и обезвреживания отработанных жидкостей.

Проектирование службы СОЖ невозможно без научного обоснования процессов, связанных с эксплуатацией жидкости. Однако значение СОЖ и рациональной организации систем их применения до сих пор еще часто недооценивается. В теории резания превалирует механо-геометрический подход, поэтому следует развивать физико-химические представления о процессах составляющих резание. В основных отделениях заводской службы по эксплуатации СОЖ осуществляются физико-химические, гидромеханические и массообменные процессы, широко используемые в химической технологии, а аппараты и оборудование, в которых они реализуются, – в химических производствах. Поэтому научное обоснование повышения эффективности систем эксплуатации СОЖ и оптимизации технологических процессов, протекающих в них должно базироваться на системном анализе физико-химических и химико-технологических основ конкретных процессов и аппаратов для функционирования СОЖ, в которых учтена специфика механообрабатывающих производств. Такой подход необходимо использовать при разработке методов и моделей для автоматизированного проектирования систем эксплуатации СОЖ.

2. Изменение условий работы абразивных зерен.

Режим работы абразивного инструмента с преимущественным затуплением характеризуется образованием площадок износа на вершинах зерен и налипанием на них металла (засаливание инструмента), микроскалыванием и незначительным разрушением зерен. При этом размерный износ круга невелик, что является необходимым условием большинства операций точного шлифования, хонингования и суперфиниширования и в значительной степени определяется составом СОЖ, находящейся в зоне контакта зерна с заготовкой [3]. Причем количество проникшей в эту зону СОЖ зависит в основном от двух факторов: скорости потока и вида контакта абразивного инструмента с заготовкой (линейного, поверхностного, точечного) [1].

При работе алмазного круга имеют место четыре вида процессов, оказывающих влияние на его работоспособность и состояние рабочей поверхности круга: истирание зерен об обрабатываемую поверхность с образованием площадок износа; хрупкое разрушение зерен микроскалыванием; вырывание зерен из связки; вышлифовывание связки стружкой [6]. При абразивной обработке в той или иной мере всегда присутствуют все перечисленные виды изнашивания зерен. Преобладание какого-либо одного вида изнашивания зависит от физико-химических свойств зерен, прочности их удержания связкой инструмента, силовых и тепловых нагрузок, действующих на зерна, состава СОЖ и его расхода, а также от других факторов, определяющих характер контактного взаимодействия при обработке. Вид преобладающего изнашивания определяет режим работы абразивного инструмента [4].

Смазочно-охлаждающая жидкость, являясь промежуточным звеном между обрабатываемой деталью и абразивным инструментом, способствует повышению эффективности обработки [3].

Применение СОЖ обеспечивает:

- образование в зоне резания защитных пленок, препятствующих непосредственному контакту зерен абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности детали, что способствует снижению выделения теплоты, а также предохранению абразивных зерен от налипания металла;
- отвод образующейся теплоты из зоны резания;
- вымывание и отвод из зоны резания отходов шлифования и др.

3. Управление параметрами потока и механизмов действий СОЖ в зоне резания.

Действие СОЖ в наибольшей степени проявляется только при условии ее проникновения непосредственно в зону взаимодействия вновь образующихся на заготовке, круге и стружке поверхностей.

Использование избыточного количества СОЖ не приводит к дополнительным положительным результатам, а лишь повышает производственные расходы. Поэтому несомненный научный и практический интерес представляют исследования, направленные на определение условий своевременного и надежного транспортирования СОЖ к образующимся при шлифовании ювенильным поверхностям при использовании минимально необходимых расходов СОЖ. Анализ механизмов смазывающего, смачивающего и проникающего, охлаждающего, моющего, режущего и пластифицирующего действия СОЖ позволяет сделать вывод о том, что для повышения эффективности действия СОЖ необходимо повышать ее давление и скорость течения в зонах контакта абразивных зерен и металла заготовки [5]. Отмечается, что при шлифовании без СОЖ взаимодействие абразивного инструмента и заготовки происходит в более экстремальных условиях, чем при шлифовании с СОЖ. В отсутствие защитных пленок и ряда эффектов, обеспечиваемых при использовании СОЖ, значительно интенсифицируются контактные физико-химические явления. Под воздействием высоких температур и давлений в зоне резания происходит адгезионное схватывание абразива с обрабатываемым материалом, взаимная диффузия химических элементов, увеличение работы трения связки и абразивных зерен с обрабатываемой заготовкой и, как следствие, разупрочнение и разрушение абразивных зерен, а также формирование поверхностного слоя детали с неблагоприятными эксплуатационными характеристиками [5].

При подаче СОЖ гидроаэродинамическим способом энергия воздушных потоков, создаваемых вращающимся кругом, используется для повышения скорости движения жидкостного потока относительно рабочей поверхности круга и шлифуемой заготовки. С помощью специальных устройств активированный поток СОЖ направляется на рабочую поверхность круга в область его контактирования с заготовкой. Известно достаточно много разновидностей гидроаэродинамического способа подвода СОЖ и множество конструкций кожухов, торцевых насадков и т.п., позволяющих разгонять СОЖ за счет вращения инструмента и одновременно перемещать ее к зоне обработки. Важнейшей положительной особенностью данных способов является то, что повышение скорости движения СОЖ относительно заготовки, обеспечивается за счет использования самого вращающегося абразивного круга. Общим недостатком известных конструкций является то, что, несмотря на разгон СОЖ практически до скоростей резания, они не обеспечивают гарантированной транспортировки СОЖ ювенильным поверхностям заготовки [5].

При подаче СОЖ напорной струей давление жидкости в соплах насадков повышают до 1,0-1,5 МПа, а при скоростном и силовом шлифовании до 130-150 МПа и более. Однако указанные значения давления являются давлением жидкости в соплах, а не в зоне взаимодействия круга и заготовки, что совсем не одно и то же. Использование повышенного давления СОЖ в соплах позволяет повысить скорость движения потока СОЖ относительно заготовки, что интенсифицирует отвод тепла от шлифуемой заготовки и облегчает преодоление воздушных потоков, генерируемых вращающимся инструментом, но не гарантирует надежного попадания СОЖ в зону резания [5]. Для этого необходимо вести работы по совершенствованию конструкций насадков и сопел, через которые подается СОЖ.

Заключение

1. К смазочно-охлаждающей жидкости предъявляются жесткие требования по составу и характеристикам, обусловленные соответствующими стандартами, а также высокие требования к организации обеспечения чистоты СОЖ.

2. Для эффективного применения СОЖ важное значение имеют организационно-технические мероприятия и правильный выбор режимов использования СОЖ на производстве.

3. Способ подачи СОЖ напорной струей жидкости оказывает влияние на параметры работоспособности и стойкости шлифовального инструмента, а также позволяет повысить производительность обработки и качество обрабатываемой поверхности детали. Благодаря указанному способу подачи есть возможность сократить расход абразивного инструмента.

Список литературы: 1. Фесенко, А.В. Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 41. – С. 71-100. 2. Худобин, Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с. 3. Профессиональный портал «Сварка. Резка. Металлообработка». Тепловые явления и смазочно-охлаждающие жидкости при шлифовании – Режим доступа: https://www.autowelding.ru/publ/1/rezanie_metallov/teplovy_e_javlenija_i_smazочно_okhlazhdajushhie_zhidkosti_pri_shlifovanii/23-1-0-299. – Дата обращения: 15.04.2018. 4. Гусев, В.В. Управление режущей способностью алмазных кругов как фактор повышения эффективности шлифования изделий из керамики / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, А.Л. Медведев, Д.Ю. Семенюк // Наукові праці ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Вып. 8. – С. 35-43. 5. Ассортимент, область применения и свойства СОТС (фирма «АЗМОЛ»). – Режим доступа: http://www.azmol.dp.ua/spravka/spr_54.htm. – Дата обращения: 14.04.2018. 6. Блурцян, Д.Р. Уменьшение расхода СОЖ при шлифовании / Д.Р. Блурцян // Научные труды Муромских ученых. – Муром: МИ ВлГУ. – 2002. – С. 46-50.

ОБЗОР СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Портной П.В., Молчанов А.Д.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация. В данной статье представлен обзор системы автоматического управления на базе нечеткой логики, позволяющей управлять различным технологическим оборудованием на предприятиях.

Ключевые слова: система автоматического управления, нечеткая логика, адаптивная система, автоматизация, режимы резания

Традиционный подход к синтезу САУ основывается на том, что модель объекта управления (ОУ) заранее известна и задана либо в виде экспериментальных переходных характеристик, либо в виде передаточных функций отдельных каналов объекта. При известной цели управления алгоритм функционирования управляющего устройства (УУ) в этом случае однозначно предопределяется самой моделью и целью управления.

Однако на практике при автоматизации сложных технологических процессов, в том числе и процессов горно-обогатительного производства, получить математическую модель, достаточно полно отражающую реальные процессы в объекте, практически невозможно. Поэтому большинство реально действующих в промышленности автоматических систем управления сложными процессами создано, как правило, с использованием не только методов классической теории управления, но и с использованием методов экспериментального уточнения параметров системы, т.е. так называемой «настройкой системы на объект».

В настоящее время на смену этим методам приходят новые методы создания алгоритмов управления, выполненные на основе так называемой нечеткой логики (фаззи-логики).

Трудности создания высокоэффективных систем автоматического управления в отрасли механообработки обусловлены сложностью технологического процесса резания (ПР) как объекта управления (ОУ) – его многомерностью, многорежимностью, малым объемом априорной информации о внутренних и внешних связях. Накопление трудноразрешимых в рамках классической теории управления проблем стимулирует интенсивное внедрение и развитие идей и методов искусственного интеллекта для управления сложными техническими объектами, какими является процесс механообработки и мехатронная станочная система [1, 2]. Эффективность процесса механообработки определяется технико-экономическими показателями процесса резания, которые напрямую зависят от оптимальности выбора режима резания. Следовательно, эффективность управления процессом резания неразрывно связана с задачей управления режимами ПР. Под термином «режимы резания» понимается совокупность числовых значений глубины резания, подачи, скорости резания, геометрических параметров и стойкости режущей части инструментов, а также силы резания, мощности и других параметров процесса резания, от которых зависят технико-экономические показатели [3]. На режимы резания также значительное влияние оказывают марка обрабатываемого материала и материала режущей части резца, их физико-механические свойства, состояние их поверхностей, вид обработки (точение, фрезерование, сверление и т. д.), характер обработки (черновая или чистовая), условия обработки (непрерывная или прерывистая), температура в зоне резания Θ , подача охлаждающей жидкости СОЖ. Отсюда вытекает необходимость в контроле и управлении режимными

параметрами, что целесообразно реализовать в виде системы автоматического управления режимами резания, которая обеспечит оптимальный процесс обработки, используя не только априорную информацию о ПР и рекомендации по выбору значений режимных параметров, но и измеряемую информацию о силе резания и температуре резания [4]. Традиционно среди всех режимных параметров выделяют P_z и Θ как наиболее информативные при исследовании и управлении процессом резания, а также наиболее доступные для измерения. Современное производство требует интенсификации режимов резания, что нередко приводит к увеличению сил резания и температуры в зоне резания. В условиях существенного роста температуры и сил резания одновременное управление процессом резания с поддержанием постоянства силы P_z и температуры в зоне резания Θ позволит сформировать температурно-силовой режим обработки, удовлетворяющий требованию точности формообразования и эксплуатационных свойств поверхностей детали [5, 6]. Температура в зоне резания и главная составляющая силы резания при точении определяются по следующим эмпирическим зависимостям [1, 3, 7, 8]:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{P_z} + t_p^z + S^y + V^x + K_p \\ \Theta &= C_\Theta + t_p^q + S^n + V^m (\sin(\varphi))^{n-q} \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{P_z} – константа, зависящая от свойств обрабатываемого материала, по сути своей представляющая удельную силу резания, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения среза, Н/мм²; t_p – глубина резания, мм; S – подача, мм/об, V – скорость резания, м/мин; K_p – общий коэффициент, представляющий собой произведение частных коэффициентов, учитывающих конкретные условия резания; C_Θ – коэффициент, выражающий зависимость теплоотдачи от обрабатываемого материала и условий резания; φ – главный угол в плане, градусов. Показатели степени x , y , z , m , n , q являются вещественными числами, показывающими степень влияния каждого из параметров режима резания соответственно на силу резания и температуру в зоне резания [9].

Как известно, процесс резания включает в себя множество сопутствующих явлений различной природы (кроме механических и тепловых, также электрохимических и т. д.), которые имеют сложные взаимные и внутренние связи, к тому же параметры в зоне резания недоступны для непосредственного измерения. Все это в совокупности усложняет исследования ПР. Усложненные условия исследований приводят к недостаточной изученности процесса резания, а большое число параметров и сложных, не поддающихся формализации взаимосвязей приводят к практически полному отсутствию математического описания на основе физических законов. Именно поэтому формулы, применяемые в инженерных расчетах режимов резания, как и в целом современные знания о ПР, имеют эмпирический характер. Наиболее широко используемым способом построения моделей ПР является аппроксимация экспериментальных данных аperiодическими звеньями 1-го или 2-го порядка. Например, модель, построенная путем аппроксимации экспериментальных данных исследований [7] по подаче S и главной составляющей силы резания P_z для управления процессом точения (ПТ), может определяться следующим образом:

$$W_{P_z}(s) = \frac{K_p(S)\tau}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (2)$$

где $T_{1, 2} = 0,5$; B – параметр жесткости станочной системы, зависящий от податливости упругой системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» и коэффициента пе-

редачи ПТ; $K_P(S) = \frac{\partial P_z}{\partial S}$ – коэффициент передачи для главной составляющей силы резания по подаче S , которая рассматривается в качестве управляющего воздействия; τ_{um} – период вращения шпинделя, принимается постоянным значением [7].

Выражение (2) описывает модель по основной зависимости $P_z(S)$, т. е. динамика системы зависит от изменения подачи, остальные параметры ПТ считаются постоянными значениями. Модель, описываемая выражением (2), достаточно проста и удобна для реализации в системах автоматического управления и исследования поведения ПТ по силовой координате при конкретном виде и режиме обработки детали, т. е. при вполне конкретных неизменных условиях. В модели выражения (2) можно наблюдать излишнюю идеализацию применительно к задаче управления режимами резания: разрыв существенной связи между параметрами ПТ (в основе модели лежит зависимость $P_z(S)$ вместо, например, $P_z(S, V, t_p)$, линеаризация (получаемая в результате аппроксимации характеристики нелинейного процесса линейным звеном 2-го порядка). Все это в совокупности приводит к неточности модели и неадекватному отражению поведения реального процесса. Кроме того, как уже отмечалось выше, требуется осуществить контроль одновременно двух параметров силы и температуры резания, что соответственно должно быть отражено в модели ПТ. Следовательно, модель ПТ должна быть многомерной (S, V, t_p – управляющие параметры; P_z, Θ – управляемые параметры) и многорежимной (обеспечить исследование, например, чернового и чистового режимов резания). Эти обстоятельства приводят к необходимости поиска принципиально новых подходов к решению задачи построения моделей ПТ, позволяющих обеспечить требуемую для САУ многомерность, многорежимность, многосвязность (большое число параметров ПТ находятся в сложных взаимосвязях, не поддающихся формализации) и нелинейность ПТ. В данной статье предлагается метод нечеткого моделирования Такаги-Сугено [5] в качестве решения проблемы построения модели в данных условиях. Суть данного метода сводится к аппроксимации нечеткими множествами нелинейных компонентов модели и всех компонентов, точное определение которых либо затруднительно, либо приводит к значительному усложнению модели. Аппарат нечеткой логики Такаги-Сугено позволяет аппроксимировать трудноформализуемые компоненты модели и вместе с тем обеспечивает требуемые качества многомерности, многосвязности и т. д.

Цель управления определяется требованиями оптимальности переходных процессов выходных координат P_z, Θ на всех режимах функционирования системы (по быстрдействию и перерегулированию), поддержанием постоянства значений $P_z = \text{const}$ и $\Theta = \text{const}$ для каждого режима резания и минимумом ошибок рассогласования между преобразованными измерительной системой сигналами $E_{P_z}(t), E_{\Theta}(t)$ выходных координат P_z, Θ соответственно, и заданных воздействий $u_{P_z}^*, u_{\Theta}^*$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{P_z}(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_{\Theta}(t) = 0, \quad t \rightarrow 0, \quad (3)$$

$$P_{zi} = \text{const}, \Theta_i = \text{const},$$

где i – число режимов работы системы (режимов резания); $e_{P_z}(t) = u_{P_z}^*(t) - E_{P_z}(t)$ и $e_{\Theta}(t) = u_{\Theta}^*(t) - E_{\Theta}(t)$ – ошибки рассогласования соответственно силы резания P_z и температуры в зоне резания Θ . Схему САУ процесса точения можно представить в следующем виде (рис. 1).

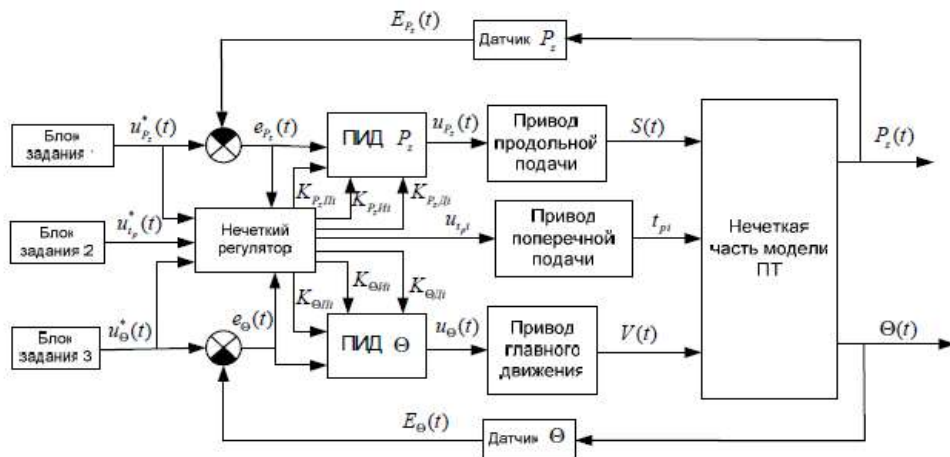


Рис. 1. Схема САУ процессом точения [10]

На рис. 1 блоки задания 1, 2, 3 предназначены для подачи задающих напряжений $u_{P_z}^*(t)$, $u_{\Theta}^*(t)$, $u_{t_p}^*(t)$ соответственно. САУ режимами резания представляет собой два ПИД-регулятора для регулирования координат P_z , Θ и адаптивной надстройки в виде нечеткого регулятора, который выполняет функцию настройки ПИД-регуляторов и формирования управляющего напряжения для привода поперечной подачи на определенный режим резания. Настройка ПИД-регуляторов осуществляется подачей соответствующих коэффициентов [10].

Данная САУ режимами резания, которая обеспечивает оптимальное формирование режимных параметров процесса точения для чернового и чистового режимов резания в реальном режиме времени, что позволяет сэкономить время на переналадку станка и повысить эффективность ПТ. Обеспечение постоянства значений параметров P_z , Θ и рациональная настройка режимных параметров ПТ позволяют улучшить качество выпускаемой продукции, повысить технико-экономические показатели ПТ. Используемая при разработке алгоритма управления нечеткая модель ПТ позволяет значительно снизить неопределенность ПТ путем использования двух измеряемых координат (P_z и Θ) вместо обычной одной и учета зависимостей $P_z(S, V, t_p)$ и $\Theta(S, V, t_p)$, что в свою очередь позволяет повысить точность САУ. Однако главные недостатки этой модели – громоздкость и значительные требования к вычислительным ресурсам. Поэтому представленную нечеткую модель ПТ будет затруднительно использовать во встраиваемых автоматических системах управления. Главным предназначением данной модели является применение в исследовании процесса точения и в разработке алгоритмов управления для систем управления ПТ. Эта особенность модели и наличие таких особенностей, как многомерность и многорежимность, практически полностью исключают возможность использования классических методов управления, адаптивных методов управления с эталонной моделью, а также использование всевозможных наблюдателей состояния системы.

Заключение

В данной статье рассмотрена САУ режимами резания, которая обеспечивает оптимальное формирование режимных параметров ПТ для чернового и чистового режимов резания в реальном режиме времени, что позволяет сэкономить время на переналадку станка и повысить эффективность ПТ. Обеспечение постоянства значений параметров P_z , Θ и рациональная настройка режимных параметров ПТ позволяют улучшить качество выпускаемой продукции и повысить технико-экономические показатели ПТ. Используемая при разработке алгоритма управления нечеткая модель ПТ позволяет значительно снизить не-

определенность ПТ путем использования двух измеряемых координат (P_z и Θ) вместо обычной одной и учета зависимостей $P_z(S, V, t_p)$ и $\Theta(S, V, t_p)$, что в свою очередь даёт возможность повысить точность САУ.

Список литературы: 1. Зориктуев, В.Ц. Идентификация и автоматическое управление технологическими процессами в станочных системах: Учеб. пособие // В.Ц. Зориктуев. – Уфа: Уфимск. авиац. ин-т, 1992. – 118 с. 2. Основы автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении / Под ред. В.Ц. Зориктуева. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2000. – 406 с. 3. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 4. Рубинштейн, С.А. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С.А. Рубинштейн и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 386 с. 5. Kazou, T. Fuzzy control systems design and analysis / T. Kazou, H.O. Wang. – JohnWiley&Sons, Inc, 2001. – 303 p. 6. Васильев, С.В. ЭДС и температура резания / С.В. Васильев. – Станки и инструмент. – 1980. – № 10. – С. 20-22. 7. Остафьев, В.А. Адаптивная система управления / В.А. Остафьев, Г.С. Тымчик, В.В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – Киев, 1983. – № 1. – С. 18-20. 8. Шарабура, С.Н. Система адаптивного управления процессом обработки деталей на станках с ЧПУ / С.Н. Шарабура, В.В. Шевченко // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 6. Ч. 1. 9. Бобров, З.Ф. Основы теории резания металлов / З.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 10. Зориктуев, В.Ц. Система автоматического управления режимами резания на основе нечеткой логики / В.Ц. Зориктуев, Р.Р. Шангареев. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 8 с.

СИМУЛЯТОР ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Рыжаев А.А., Поезд С.А.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация. В статье рассматривается симулятор промышленных роботов V-Rep и его возможности, также в статье произведен аналитический расчет траектории движения руки робота ABB IRB 140 и сравнение с траекторией, получаемой с помощью графопостроителя в робосимуляторе V-REP.

Ключевые слова: симулятор, манипулятор, схват, матрица, графопостроитель.

Введение

В наше время возможности эксплуатации роботов потрясающие, их используют повсюду, начиная от исследования космоса и заканчивая чисткой домов. Сочетание в роботах трех подсистем: актуатора, сенсора и дистанционного управления делает их чрезвычайно эффективными, но и в тоже время дорогостоящими, что в свою очередь не прощает ошибок. И тут к нам на помощь приходят различные программы - симуляторы, одной из таких программ является робосимулятор V-REP.

V-REP представляет собой среду для симулирования (sandbox) различных видов роботов, при этом пользователю нет необходимости иметь физический доступ к реальной машине, что экономит деньги и время. Среда V-REP предоставляет удобный интерфейс для визуализации действий робота в трёхмерном виртуальном пространстве намного раньше, чем реальный прототип робота будет создан [1].

Возможна самостоятельная сборка симулятора из приведенных кинематических, физических и графических библиотек, и решающее значение, с точки зрения производительности и точности симуляции, будут иметь архитектура и используемая методология. Надежный системный подход требует использования универсальных и масштабируемых стратегий моделирования. Кроме того управляющие программы пишутся на простом языке, что чрезвычайно удобно.

Основное содержание работы

1. Функции моделирования V-Rep

V-REP разработан на базе универсальной архитектуры, и в нем нет главного или центрального модуля. Вместо этого V-REP состоит из относительно самостоятельных функциональных групп, которые могут быть включены или выключены по мере необходимости [2].

2. Объекты моделирования

Симуляционные модели V-REP содержат несколько объектов или элементов, которые собраны в древовидную иерархию. Ниже описаны сцены моделирования, поддерживаемые V-REP[1]:

- Сочленения: элементы, которые связывают два или более объекта сцены вместе, обеспечивая от одной до трех степеней свободы (призматические, вращательные, винтовые, или сферические). Они могут работать в различных режимах (например, в силовом/вращательном режиме, режиме обратной кинематики и др.)

- Формы: треугольные полигональные сетки, используемые для моделирования и визуализации твердого тела.

- Бесконтактные датчики: Они вычисляют точное минимальное расстояние к части фигуры, которая находится в пределах обнаружения. Это дает непрерывную и более реалистичную симуляцию, чем обнаружение на основе большого количества направленных лучей.

- Визуальные датчики: визуальные датчики позволяют извлекать сложные изображения и информацию из сцен моделирования (цвета, размер объектов, глубина карты и др.). Встроенная фильтрация и функция обработки изображений запускает целый блок из фильтрующих элементов. Визуальные датчики используют аппаратное ускорение для получения RAW изображений (поддержка OpenGL).

- Датчики силы: они представляют собой жесткие связи между фигурами, которые могут записывать приложенные силы и крутящие моменты, и которые могут разрушаться при превышении заданного порога.

- Графики: графики могут записывать большое разнообразие предопределенных или пользовательских потоков данных. Потоки данных затем могут быть отображены напрямую (график по времени заданного типа данных), или в сочетании друг с другом для отображения X/Y графиков, или 3D кривых.

- Камеры: они позволяют визуализировать сцены, которые зависят от точки наблюдения.

- Освещение: освещают сцену или отдельные объекты сцены, и влияют на камеры или визуальные датчики.

- Пути: они определяют сложное движение в пространстве (последовательность свободно комбинируемых переводов, вращений и/или пауз), и используются, например, для направления сварочной горелки робота вдоль заданной траектории, или позволяют задать движение конвейерной ленты.

- Материальные точки: это вспомогательные системы отсчета, которые могут быть использованы для различных задач. В основном используются в сочетании с другими объектами сцены.

- Фрезы: могут быть использованы для имитации поверхности режущих операций на формы (например, фрезерование, лазерная резка и др.)

3. Вычислительные модули

Объекты моделирования редко используются самостоятельно, они скорее работают на или совместно с другими объектами (например, датчик приближения обнаруживает формы). Кроме того, V-REP предлагает несколько расчетных модулей, которые могут напрямую работать на одну или несколько сцен моделирования. Ниже приведены основные расчетные модули:

- Модуль кинематики: позволяет выполнять кинематические расчеты (прямые и обратные) для любого типа механизма (разветвленные, закрытые, с резервированием, содержащие вложенные циклы и др.). Модуль базируется на расчете наименьших затухающих квадратов.

- Динамический модуль: позволяет регулировать динамику расчета твердого тела и взаимодействия (столкновение, цепляние и др.) с помощью Bullet Physics Library и Open Dynamics Engine. Симуляции динамических систем до сих пор находятся на начальном этапе и часто основываются на приблизительных показателях. Для подтверждения результатов важно основываться не только на одном физическом движке.

- Модуль обнаружения столкновений: позволяет осуществлять быструю проверку столкновений между любой формой или набором фигур. Этот модуль является полностью независимым от ответа алгоритмов расчета динамики модуля. Используются структуры

данных, основанных на бинарном дереве прямоугольных боксов для ускорения. Дополнительная оптимизация достигается за счет техники кэширования.

- Модуль расчета расстояния (Mesh-mesh модуль): позволяет быстро минимизировать расстояние расчета между любыми формами (выпуклые, вогнутые, открытые, закрытые и т.д.) или набором форм. Модуль использует те же структуры данных, что и модуль обнаружения столкновений.

- Модуль планирования движения: ручное планирование голономных и неголономных задач с помощью подхода, основанного на алгоритме [Rapidly-exploring Random Tree \(RRT\)](#). Задачи по планированию путей кинематических цепей также поддерживаются.

4. Аналитический расчет траектории движения робота ABB IRB

В качестве примера использования робосимулятора V-REP произведем аналитический расчет траектории движения робота ABB IRB 140 и сравним с траекторией, получаемой с помощью графопостроителя в робосимуляторе V-REP (рис. 1).



Рис. 1. Траектория движения робота ABB IRB 140 в робосимуляторе V-REP

Для аналитического описания траектории движения выходного звена необходимо определиться с системой координат звеньев манипулятора. Координатные оси расставлялись методом Денавита-Хартенберга.

Метод заключается в том что, каждая система координат формируется на основе следующих трех правил [3](рис.2):

- 1) ось z_{i-1} направлена вдоль оси i -го сочленения;
- 2) ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и направлена от нее;
- 3) ось y_i дополняет оси x_i, z_i до правой декартовой системы координат.

На рис. 2, а указаны габаритные размеры промышленного робота, на рис. 2, б показаны направления осей систем координат каждого звена робота.

Для промышленного робота ABB IRB 140 была составлена цепочка перемещений от 0-го звена (основание манипулятора) до 5-го звена, относительно которого особая точка неподвижна, после чего были составлены матрицы преобразования координат Денавита-Хартенберга для каждого перехода (рис. 3) [4, 5].

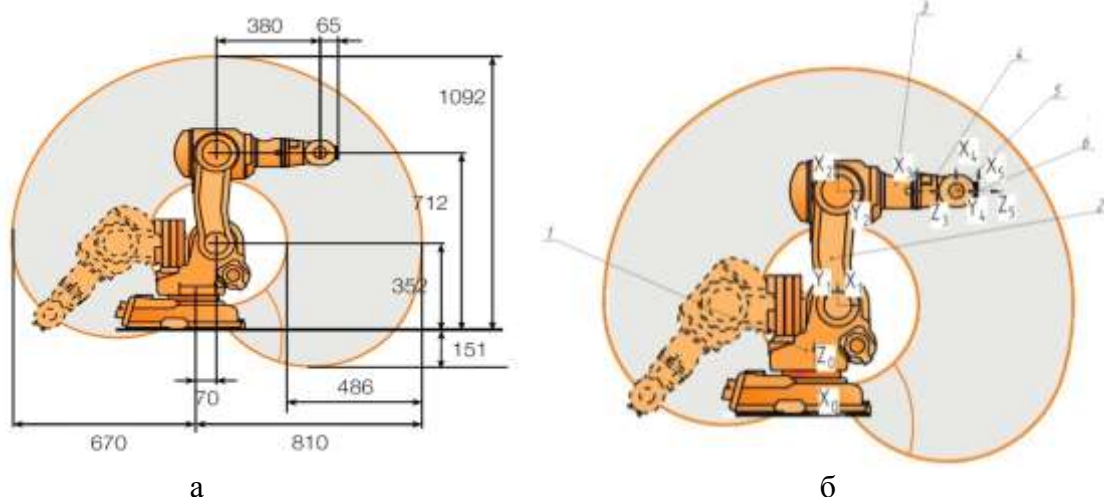


Рис. 2. Размеры и система координат звеньев робота ABB IRB 140

$d1(i1) = 352 \text{ мм}$
 $a1$ – линейное смещение = 70 мм
 $\alpha 1$ – угловое смещение = $\pi/2$

$d1(i1) = 0 \text{ мм}$
 $a1$ – линейное смещение = $712 - 352 = 360 \text{ мм}$
 $\alpha 1$ – угловое смещение = 0

$d1(i1) = 0 \text{ мм}$
 $a1$ – линейное смещение = 240 мм
 $\alpha 1$ – угловое смещение = $\pi/2$

$$\begin{matrix}
 0 & \begin{matrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & 1 & \begin{matrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & 2 & \begin{matrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & 3
 \end{matrix}$$

$d1(i1) = 140 \text{ мм}$
 $a1$ – линейное смещение = 0 мм
 $\alpha 1$ – угловое смещение = $\pi/2$

$d1(i1) = 0 \text{ мм}$
 $a1$ – линейное смещение = 65 мм
 $\alpha 1$ – угловое смещение = $\pi/2$

$$\begin{matrix}
 3 & \begin{matrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & 4 & \begin{matrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & 5
 \end{matrix}$$

Рис. 3. Матрицы перехода от звена к звену промышленного робота

5. Сравнение траектории движения робота, полученной расчетным способом, и с помощью программы.

На рис. 4 представлены результаты решения прямой задачи о положении манипулятора в табличной форме, полученные с использованием пакета прикладных программ Mathcad, на рис.5 – результаты решения задачи о положении манипулятора в графической форме.

Из рис. 4 и рис. 5 видим, что траектория движения точки схвата в системе координат XY имеет узнаваемую форму круга, различием является числовые значения на системах координат, что объясняется различной метрической системой при вычислении.

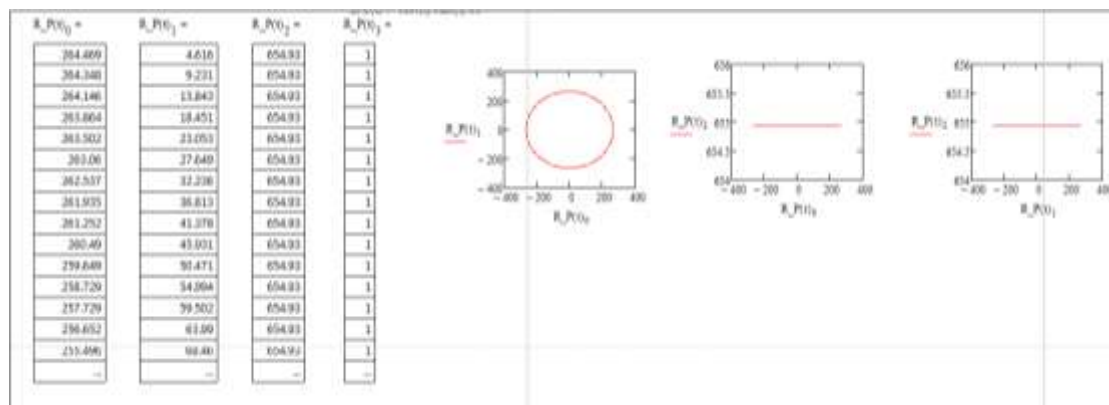


Рис. 4. Точки траектории движения робота, полученной расчетным способом

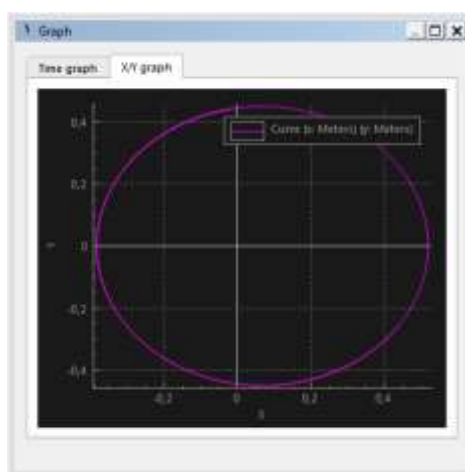


Рис. 5. Траектория движения робота, полученная с помощью программы V-Rep

Вывод.

В данной работе были рассмотрены возможности программы V-Rep по моделированию траектории движения руки робота и проведен аналитический расчет. Как видно из полученных графиков, траектория движения точки схвата в системе координат XY имеет узнаваемую форму круга, различием является числовые значения на системах координат, объясняемым различной метрической системой при вычислении.

Список источников: 1. Сайт «Geektimes». V-REP – гибкая и масштабируемая платформа для роботомоделирования. – Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/260370/>. 2. Шалыгайло Сергей. Использование Remote API в робосимуляторе V-REP. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/268313/>. 3. StudFiles. Представление Денавита-Хартенберга. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/985240/page:9/>. 4. Корендясев, А.И. Теоретические основы робототехники: монография в 2-х кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; ред. С.М. Каплунов; Рос. ин-т машиноведения им. А.А. Благоднарова. – Москва: Наука, 2006. – ISBN 5-02-033952-0. Кн. 1. – 2006. – 383 с. 5. Булгаков, А.Г. Промышленные роботы: кинематика, динамика, контроль и управление / Булгаков А. Г., Воробьев В.А. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2007. – 485 с.: ил., табл.; 22 см. – (Серия «Библиотека инженера»); ISBN 978-5-91359-013-8.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В SOLIDWORKS

Узун В.И., Поезд С.А.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

Аннотация. Статья посвящена моделированию распределения тепловых полей в образце из ситалла AC-418 в среде Solidworks и подтверждению результатов моделирования фотографиями тепловизора FLIR C2.

Ключевые слова: ситалл AC-418, распределение температурных полей, тепловизор, температурный анализ.

Температурные характеристики процесса шлифования, учитывающие влияние параметров режима и условий обработки на температуру в зоне резания, которая, в свою очередь, влияет на качество сформированной поверхности, требуют дальнейших исследований. Важной характеристикой тепловой нагрузки на обрабатываемый материал является характер распространения в нем температурных полей. Экспериментальное исследование характера распространения температурных полей при шлифовании затруднительно из-за наличия СОТС и летящей стружки. Более простым способом является моделирование распределения температурных полей с экспериментальным подтверждением.

Теоретическая задача распределения температурных полей решалась с использованием пакета твердотельного моделирования Solidworks. С помощью встроенного добавления SOLIDWORKS Simulation было проведено термическое исследование смоделированного образца из ситалла AC-418. Данный материал не является стандартным для пакета, в связи с чем он был добавлен вручную (рис. 1).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	85000	Н/мм ²
Коэффициент Пуассона	0.25	Не применимо
Модуль сдвига		Н/мм ²
Массовая плотность	2900	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	60	Н/мм ²
Предел прочности при сжатии	1450	Н/мм ²
Предел текучести		Н/мм ²
Коэффициент теплового расширения	273.1500029	/К
Теплопроводность	0.047	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	Температурно-завис	J/(кг·К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо

Рис. 1. Теплофизические характеристики ситалла AC-418, занесенные в Solidworks

Удельная теплоемкость ситаллов и стеклокерамики возрастает с повышением температуры (рис. 2), а характер этих изменений подобен изменениям в стеклах и других видах оксидных керамических материалов [1].

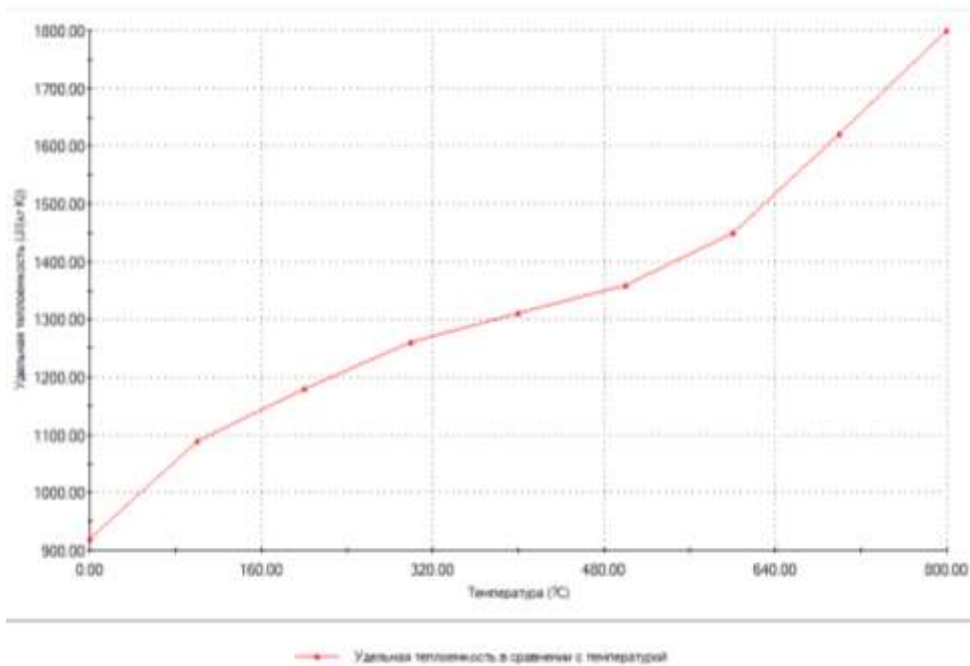


Рис. 2. Зависимость удельной теплоемкости ситалла AC-418 от температуры

Согласно имеющимся размерам деталей (рис. 3) моделировался образец, которому присваивался материал «Ситалл AC-418». Анализ проходил в устойчивом состоянии термического воздействия при начальной температуре объекта 21°C. К образцу в качестве термической нагрузки прикладывалась температура равная 200°C в течении минуты. График воздействия температуры во времени изображен на рис. 4. Для дальнейшего исследования пакетом Solidworks создавалась сетка на твердом теле, и производился расчет распределения температурных полей в изделии с выводом результатов на экран (рис. 5).

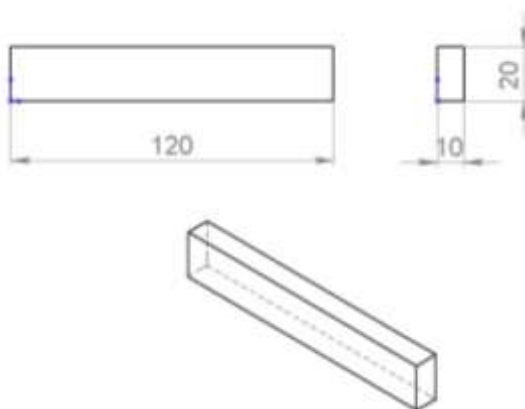


Рис. 3. Эскиз образца из ситалла AC-418 для моделирования в Solidworks

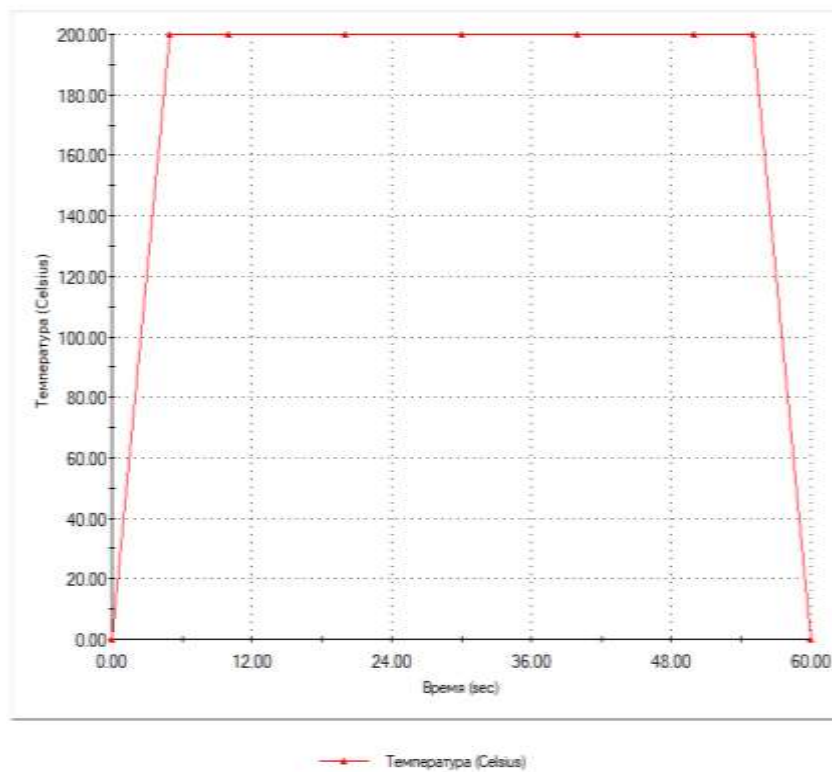


Рис. 4. Воздействие температуры в течение минуты

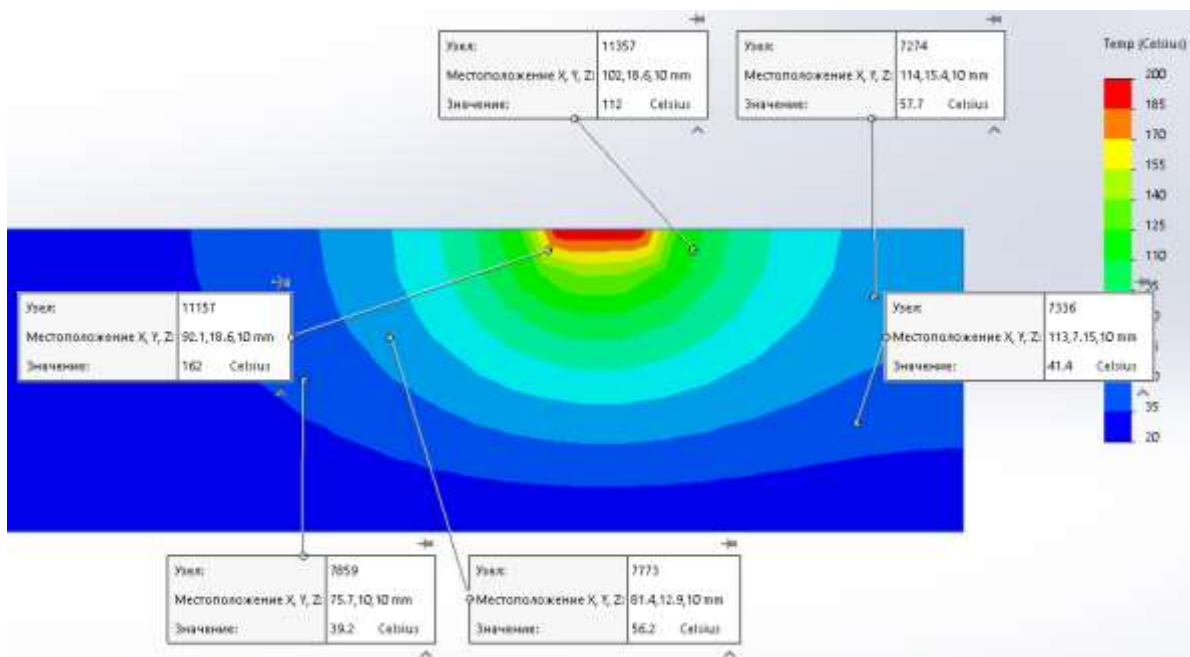


Рис. 5. Исследование характера распространения температурных полей в изделиях из ситалла при воздействии температур, характерных для шлифования, с использованием пакета Solidworks

Для подтверждения исследования распределения температур в теле образца проводился статический эксперимент. Эксперимент осуществлялся с помощью тепловизора FLIR C2, технические характеристики которого приведены в табл. 1. FLIR C2 – это полнофункциональная компактная тепловизионная камера, применяемая в строительной отрасли. Однако ее функциональность позволяет применять камеру и в других областях, в частности в машиностроении. С ее помощью можно обнаруживать невидимые невооруженным глазом утечки энергии, структурные дефекты, распространение температурных полей и т.д. Камера C2 обладает такими важными возможностями и характеристиками, как повышение качества изображения в режиме реального времени, высокая чувствительность, широкий угол обзора и полностью радиометрическая съемка. Такие функции камеры позволяют точно соотнести расположение температурного поля с размерами и формой исследуемого образца.

Таблица 1. Технические характеристики тепловизора FLIR C2

Оптические характеристики	
Тепловая чувствительность	не более 0,10°С
Угол обзора	41°×31°
Минимальная дистанция фокусировки: термические снимки	0,15 м
Частота смены кадров	9 Гц
Спектральный диапазон	7,5-14 мкм
3-дюймовый дисплей (цветной)	320×240 пикселей
Экран	Сенсорный
Измерения	
Диапазон температур объекта	от -10° до +150°С
Точность	± 2 С или 2%, в зависимости от того, какая величина больше, при номинальной температуре 25°С
Коррекция излучающей способности	Для матовых, глянцевых и полуглянцевых поверхностей + пользовательская настройка

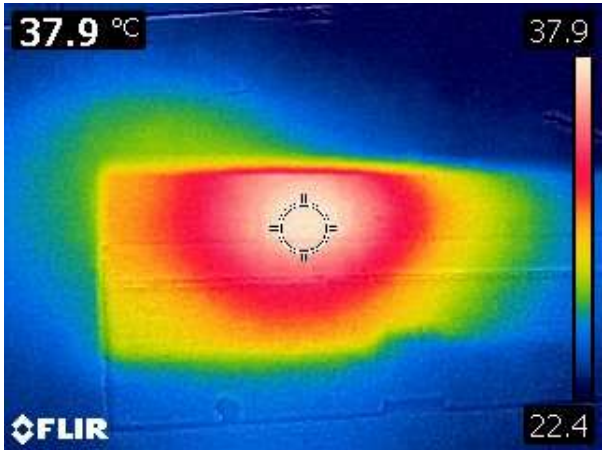
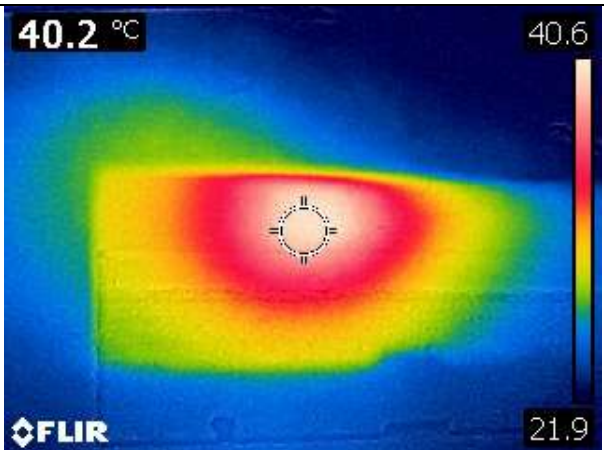
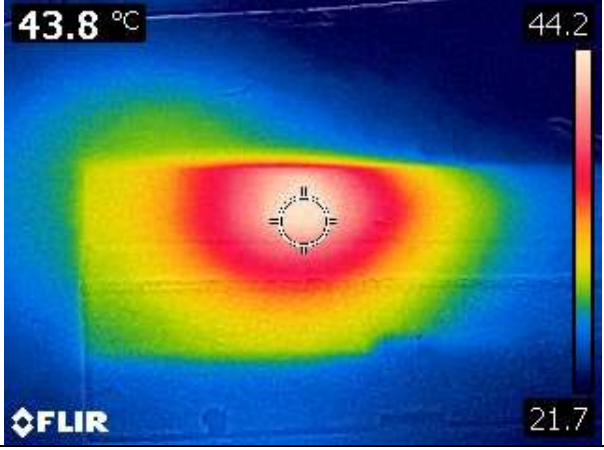
При проведении экспериментальных исследований использовался образец из ситалла АС-418, размеры которого приведены на рис. 3. Изучаемый материал относится к категории хрупких. Ему присущи дефекты структуры, обусловленные особенностями технологии его изготовления. Дефекты структуры имеют вид трещин протяженностью 5-10 мкм, равномерно расположенных в объеме материала. Плотность дефектов структуры составляет $2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$.

Для нагревания образца использовался паяльник мощностью 60 Вт. Устройство подключается к обычной бытовой электросети с напряжением 220 В. Его температуру можно изменять с помощью специального тумблера. Она может находиться в пределах от 100 до 400°С. При этом погрешность установки температур довольно низка – всего 10°С.


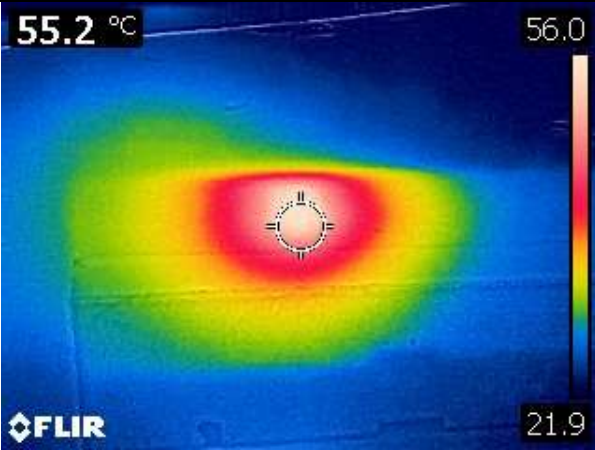
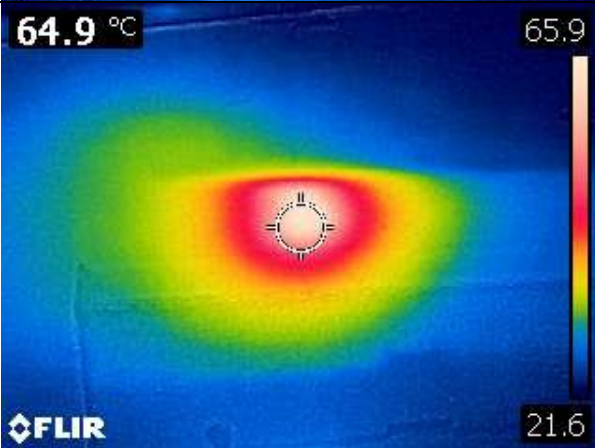
Во время проведения первого эксперимента образец устанавливался на стол и к плоскости шириной 10 мм прикладывался паяльник, жало которого было нагрето до температуры 200°С. Начальная температура образца являлась также и температурой окружающей

среды, равной 21°C. Распределение температурных полей в теле изделия из ситалла фиксировалось тепловизором. Результаты эксперимента занесены в табл. 2.

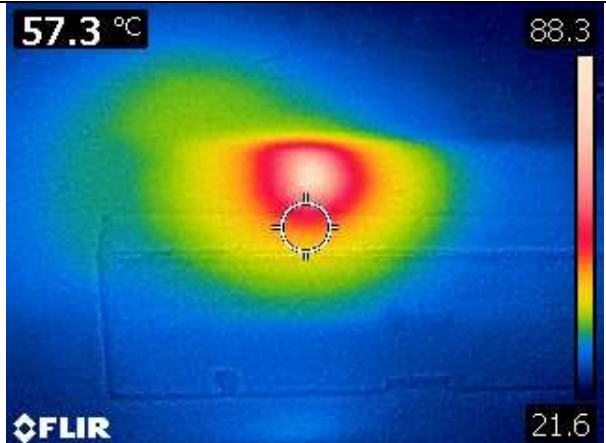
Таблица 2. Результаты экспериментального исследования распределения температурных полей в теле образца из ситалла АС-418

Время воздействия на образец	Максимальная температура на поверхности образца	Термическое изображение
1	2	3
5 сек	37,9°C	
5+5 сек	40,6°C	
5+5+5 сек	44,2°C	

Продолжение табл. 2

1	2	3
5+5+5+5 сек	49,9°C	 <p>48.0 °C 49.9</p> <p>FLIR 21.9</p>
5+5+5+5+5 сек	56°C	 <p>55.2 °C 56.0</p> <p>FLIR 21.9</p>
5+5+5+5+5+5	65,9°C	 <p>64.9 °C 65.9</p> <p>FLIR 21.6</p>

Продолжение табл. 2

1	2	3
5+5+5+5+5+5+5 сек	88,3°C	

Из фотографий видно, что из-за низкой теплопроводности ситалла температура не распространяется вглубь материала. В середине образца при самом длительном нагреве и при моделировании уровень температур не превышал 40°C, что свидетельствует об адекватности температурной модели в Solidworks.

Вывод: Проведена работа по моделированию температурных полей в теле образца из ситалла АС-418, соизмеримой с уровнем температур, возникающих при шлифовании этого ситалла. Полученный результат моделирования подтвержден снимками с тепловизора, сделан вывод о адекватности модели. Это позволило использовать разработанную теоретическую модель для исследования температурных аспектов процесса шлифования ситалла.

Список источников: 1. Хамицаев, А.С. Теплофизические характеристики и зависимость свойств конструкционной керамики от температуры / А.С. Хамицаев // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2004. – Вып. № 5 – С. 42-53. 2. Печатное руководство «Приступая к работе: Технические характеристики» к тепловизору FLIR C2 – FLIR Systems, Inc., 2014. – 2 с. 3. Игнатова, А.М. Классификация неметаллических природных и синтетических хрупких материалов и методов их формообразования / А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов, Р.Н. Шартин // *Журнал Фундаментальные исследования*, 2014. – № 12 (часть 10). – С. 2089-2094. 4. Бесогонов, В. В. Уменьшение шероховатости поверхности ситалловой подложки до наноразмерных значений / В.В. Бесогонов, И.Н. Скворцова // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2009. – С. 73-76. 5. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты и SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 464 с. 6. Дударева, Н.Ю. SolidWorks 2009 для начинающих / Н.Ю. Дударева. – М.: БХВ-Петербург, 2016. – 700 с. 7. Большаков, В.П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex / В.П. Большаков, А. Бочков, А. Сергеев. – М.: Книга по Требованию, 2010. – 336 с. 8. Дубовик В.Н. Дефектность и уровни прочности ситаллов / В.Н. Дубовик, А.М. Райхель // *Проблемы прочности*. – 1984. – № 7. –С. 79-84. 9. Дубовик В.Н. Дефектность кордиеритовых ситаллов / В.Н. Дубовик, О.А. Непомнящий // *Катализирующая кристаллизация стекла*. – М.: Гос. НИИ стекла. – 1986. – С. 98–102.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Чернорай А.А., Полтавец В.В.

(кафедра МСМО, ГОУВПО «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР)

E-mail: vvardon@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель процесса внутреннего врезного шлифования в виде дифференциального уравнения четвертого порядка. Модель позволяет определить параметры вынужденных колебаний, связанных с дисбалансом шлифовального круга, и неблагоприятные соотношения угловых скоростей круга и детали.

Ключевые слова: шлифование, модель, запаздывание, жесткость, вибрация, амплитуда, частота

Введение

Получение поверхностей изделий требуемого качества при абразивной обработке зависит, как правило, от обеспечения оптимального сочетания динамического состояния станка с технологическими факторами. Проявляющаяся зачастую при обработке нестабильность процесса резания приводит к ухудшению показателей качества обработки вследствие возбуждения в зоне резания колебаний недопустимо высокого уровня. С целью уменьшения вероятности формирования детерминированной вибрации на частотах собственных и вынужденных колебаний обычно используют ограничение режимов резания, что нежелательно отражается на производительности процесса. Улучшение динамических показателей станка чаще всего обеспечивает смещение допустимой границы режимов в сторону их увеличения. Отсюда следует вывод о потенциальной возможности повышения качества обработки путем улучшения динамического состояния станка.

Однако стремление проектировать наиболее ответственные узлы металлообрабатывающего оборудования с улучшенными динамическими характеристиками не всегда приводит к желаемому результату. Это связано со способностью формообразующих подсистем станка образовывать при резании отличающиеся от ожидаемых динамические свойства [1].

Целью работы является рассмотрение математического описания вынужденных колебаний шлифовального круга при внутреннем врезном шлифовании, которые влияют на качество обработанной поверхности.

Основное содержание работы

Математическая модель процесса внутреннего врезного шлифования с учетом формообразующего запаздывания, контактного деформирования в зоне резания, а также упругодиссипативных свойств узлов шпинделей шлифовального круга и детали представляет собой дифференциальное уравнение четвертого порядка с отклоняющимся аргументом нейтрального типа [2]:

$$\sum_{k=0}^4 a_k x^{(k)}(t) + \sum_{k=0}^4 b_k x^{(k)}(t - \tau) = f(t),$$

$$a_0 = (k_1 + c_3)c_1c_2 + c_3k_1(c_1 + c_2);$$

$$b_0 = -k_1(c_1c_2 + c_3(c_1 + c_2));$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= (k_1 + c_3)(\xi_1 c_2 + \xi_2 c_1) + k_1 c_3(\xi_1 + \xi_2); & b_1 &= -k_1((\xi_1 c_2 + \xi_2 c_1) + c_3(\xi_1 + \xi_2)) \\
a_2 &= (k_1 + c_3)(m_1 c_2 + m_2 c_1 + \xi_1 \xi_2) + k_1 c_3(m_1 + m_2); & b_2 &= -k_1((m_1 c_2 + m_2 c_1 + \xi_1 \xi_2) + \\
&+ c_3(m_1 + m_2)); \\
a_3 &= (k_1 + c_3)(m_1 \xi_2 + m_2 \xi_1); & b_3 &= -k_1(m_1 \xi_2 + m_2 \xi_1); \\
a_4 &= (k_1 + c_3)m_1 m_2; & b_4 &= -k_1 m_1 m_2.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь k_1 – коэффициент передачи усилия резания по приращению толщины среза; c_2, c_1 – жесткости упругих систем узла шпинделя шлифовального круга и шпинделя детали; c_3 – жесткость контакта круга с деталью; m_1, m_2 – массы узлов шпинделя круга и шпинделя детали, ξ_1, ξ_2 – коэффициенты демпфирования упругих систем узлов шпинделей круга и детали; τ – время одного оборота детали (кольца подшипника) [2].

Основными факторами, влияющими на возникновение вибраций в процессе шлифования, являются плохая балансировка шлифовального круга после его правки, волнистость периферии круга, а также исходная погрешность формы колец подшипников. Все эти факторы аналитически можно описать с помощью задания периодических функций в правой части уравнения (1). Поскольку рассматриваемое уравнение представляет собой линейное уравнение с постоянными коэффициентами, то можно ограничиться определением одночастотных колебаний, возникающих в системе вследствие периодического воздействия с известными частотой и амплитудой. Сложные формы вынужденных колебаний, появляющиеся в процессе при действии сразу нескольких факторов, могут быть получены с помощью суперпозиции найденных одночастотных колебаний [2].

После преобразования функции в правой части уравнения (1) в периодический вид $f(t) = A_0 \cos(\omega t)$ была получена зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешнего воздействия, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}
R_e(P(i\omega)) &= a_0 - a_2 \omega^2 + a_4 \omega^4 - \cos(\tau\omega)(b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4) - \sin(\tau\omega)(b_1 \omega - b_3 \omega^3); \\
I_m(P(i\omega)) &= a_1 \omega + a_3 \omega^3 - \sin(\tau\omega)(b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4) + \cos(\tau\omega)(b_1 \omega - b_3 \omega^3); \\
R &= \frac{A_0}{\sqrt{R_e(P(i\omega))^2 + I_m(P(i\omega))^2}}
\end{aligned} \tag{2}$$

После проведения необходимых расчетов в работе [2] были получены графики амплитуды вынужденных колебаний и влияния времени запаздывания на величину и форму резонанса (рис. 1, 2).

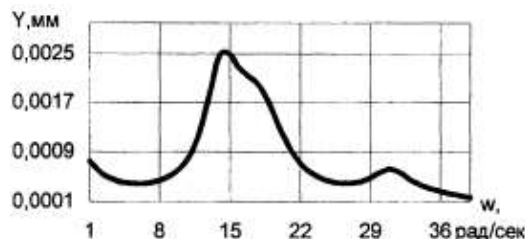


Рис. 1. Амплитуда внутренних колебаний при времени запаздывания 0,03 с [2]

На рис. 1 изображены резонансные амплитуды, соответствующие частоте собственных колебаний и частоте, близкой к собственной частоте круга.

Как видно на рис. 2, а, время запаздывания оказывает существенное влияние на форму и величину резонанса. Кроме того, существенными факторами являются как величины коэффициента передачи усилия резания и жесткости контакта круга с деталью, так и отношение этих величин. На рис. 2, б представлены те же диаграммы, что и на рис. 2, а, только в первом случае $k_1 = 10400$ Н/мм, $C_3 = 1030$ Н/мм, а во втором $k_2 = 3300$ Н/мм, $C_3 = 5000$ Н/мм [2].

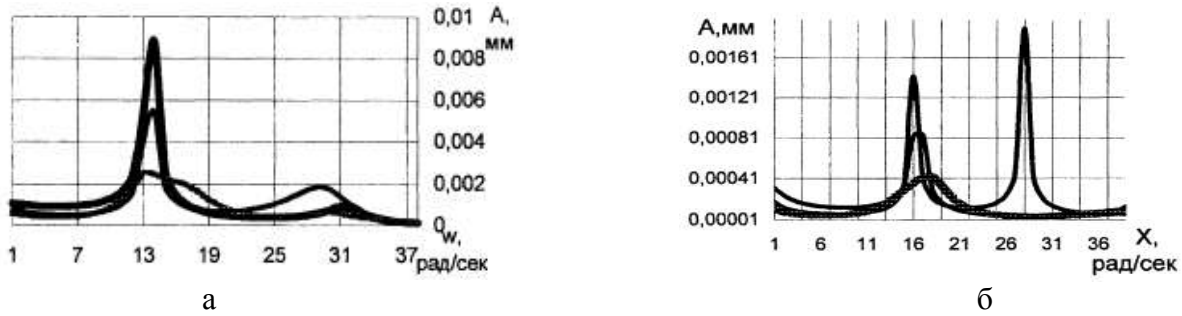


Рис. 2. Амплитуда вынужденных колебаний [2]:
а – при различных значениях запаздывания (сверху вниз – 0,01, 0,02, 0,03);
б – при различных коэффициентах жесткости контакта

Из сравнения графиков на рис. 2 видно, что при выравнивании значений коэффициентов передачи усилия резания и контактной жесткости происходит сдвиг основного резонанса в зону частот собственных колебаний круга и рост его абсолютной величины [2]. Это объясняется тем, что с ухудшением режущей способности круга происходит возрастание жесткости в зоне контакта круга с деталью, что в свою очередь приводит к возрастанию амплитуды радиальных колебаний круга.

В виду того, что исследование модели (1) достаточно сложный и трудоемкий процесс в работе [2] для исследования влияния запаздывания, связанного с вращением круга была предложена упрощенная модель, которая имеет вид:

$$(c_3 + k_1)x'(t) - k_1x'(t - \tau_1) = c_3A_B e^{i\omega t}(1 - e^{-i\omega\tau_2}), \quad (3)$$

где $x(t)$, $x(t-\tau_1)$ – координаты поверхности детали;

τ_1 – время оборота детали;

A_B , ω – амплитуда и частота колебаний внешнего воздействия [2].

После проведения преобразований было получено уравнение амплитуды вынужденных колебаний, которое имеет вид:

$$R = \frac{2A_B c_3 \left| \sin \frac{\omega\tau_2}{2} \right|}{|\omega| \sqrt{(c_3 + k_1)^2 + k_1^2 - 2k_1(c_3 + k_1) \cos \omega\tau_1}}$$

В результате расчетов было установлено значение частоты вынужденных колебаний, при котором амплитуда достигает наибольших значений:

$$\left| \sin \frac{\omega\tau_2}{2} \right| = 1, \omega = \frac{\pi(2k + 1)}{\tau_2}; \cos \omega\tau_1 = 1, \omega = 2\pi n/\tau_1$$

т.е. $\pi(2k+1)/\tau_2 = 2\pi n/\tau_1$, следовательно, $\tau_2/\tau_1 = (2k+1)/2n$.

Исходя из последнего уравнения в работе [2] был сделан вывод о том, что самым неблагоприятным является такое сочетание угловых скоростей круга и детали, при котором отношение их будет пропорционально отношению целых чисел, причем четного к нечетному числу [2]. Данное соотношение определяется заданием угловых скоростей круга и детали и независимо от частоты возмущения.

Выводы

Описанная модель процесса внутреннего врезного шлифования позволяет найти значения амплитуды и частоты вынужденных колебаний при различных значениях времени запаздывания и коэффициента жесткости контакта, а также определить такое отношение угловых скоростей круга и детали, при которых возможно будет избежать неустойчивости процесса внутреннего врезного шлифования.

Список литературы: 1. Бржозовский, Б.М. Обеспечение качества обработки шлифованием на основе синтеза оптимальных динамических свойств станка / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, И.Н. Янкин // Известия Волгоградского государственного технического ун-та. – 2006. – № 2. – С. 20-22. 2. Егорова Г.Ф. Периодические решения математической модели процесса внутреннего врезного шлифования / Г.Ф. Егорова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физ.-мат. науки. – Самара: СГТУ, 1999. – Вып. 7 – С. 197-199.