

Ма Вэйдун

**Разработка методики выбора рациональных параметров процесса
шлифования на основе учета динамических характеристик деформируемой
технологической системы**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук
Воронов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Сабиров Фан Сагирович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Станки», Московский государственный технологический университет «Станкин» (МГТУ «Станкин»)

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН)

Защита состоится 27 июня 2018 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул., 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7(499)263-66-39

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Мурашов М.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. При шлифовании маложестких деталей типа лопаток турбин при обработке возникают автоколебания, которые приводят в некоторых случаях к погрешностям формы и потере качества поверхности. Кроме того, имеют место упругие отжаты за счёт сил резания, а также возникают остаточные напряжения, которые могут привести к короблению детали и потере эксплуатационных характеристик. Следовательно, точность и качество обработанной поверхности, характер динамического поведения системы должны быть подробно исследованы, в зависимости от жёсткости крепления, геометрии детали и инструмента, режимов обработки.

В публикациях Маслова Е.Н., Marinescu D., Malkin S., Biermann D., Klocke F. приведены различные подходы для моделирования процесса шлифования. Имитационный подход предполагает моделирование для определения условий взаимодействия отдельного зерна с материалом заготовки. Как правило, для этих целей используют алгоритм геометрического моделирования, который позволяет описать изменения поверхности детали при взаимодействии с каждым зерном шлифовального круга, вычислить толщину резания зерен, с использованием этой информации, определить силы резания для отдельного зерна. Далее суммарные силы резания для активных зерен приводятся к общей системе координат шлифовального круга с целью последующего использования в динамической модели. В работах Huekun Li, Tahsin Tecelli Öpöz, Xun Chen использован метод конечных элементов (МКЭ) для анализа пластического деформирования материала при внедрении одним зерном. Существенное влияние на результат обработки оказывают также температурные деформации обрабатываемого материала детали, возникающие остаточные напряжения. В работах Rüttimann N., Roethlina M., Buhl S., Aurich J.C., Brinksmeier E. применили метод молекулярной динамики, с помощью которого исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) зоны резания при большом уровне деформации, с высокой скоростью деформирования, и высокой локальной температуре.

В настоящее время, как правило, используются эмпирические зависимости для определения сил резания от задаваемых режимов, не связанные с физическим механизмом в зоне взаимодействия при микро-резании. Кроме того, свойства материала изменяются при изменении температуры при микро-резании. Следовательно, механизм удаления материала отдельным зерном необходимо подробно исследовать. Определяющими для микро-резания являются свойства материала, толщина резания, скорость резания, геометрия режущей части зерна.

Процесс шлифования представляет собой периодическую последовательность прерывистых врезаний отдельных зерен в зоне контакта, при этом в системе инструмент-деталь неизбежно возбуждаются вибрации, которые могут иметь характер автоколебаний или вынужденных колебаний. В процессе врезания, динамический процесс откликается на собственной частоте системы и частоте прохождения зерен. В установившемся режиме, в динамической системе возбуждаются преимущественно вынужденные колебания. Кроме того, нерациональный выбор жёсткости детали или крепления инструмента может

привести к значительным динамическим смещениям, что существенно ухудшает качество и точность обрабатываемой поверхности, а также к возможной потере устойчивости процесса обработки.

Характер динамического поведения системы с одной стороны зависит от параметров и режимов обработки, таких как жёсткости крепления инструмента и детали, скорость вращения инструмента, а с другой стороны оказывает влияние на качество обработки. Поэтому выбор режимов шлифования маложестких деталей требует особого, тщательного подхода, учитывающего динамическое поведение системы инструмента-детали, нелинейный характер сил взаимодействия, в том числе механизм запаздывания.

В настоящее время отсутствуют полномасштабные работы по моделированию процесса шлифования с учётом динамики процесса, позволяющие выполнять комплексное имитационное моделирование динамики процесса плоского шлифования и выбирать рациональные режимы обработки на основе результатов моделирования.

Исследования, представленные в диссертации, проведены в рамках совместных научно-исследовательских работ с предприятием АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», где эта проблема актуальна, так как решение её позволит поднять производительность и обеспечить качество обработки маложестких деталей, таких как лопатки газо-турбинных двигателей.

Целью диссертационной работы является разработка математической модели и методов анализа динамики процесса шлифования маложестких деталей для проектирования технологии обработки, позволяющей обеспечить требуемые критерии качества и производительности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Разработка методики расчета сил резания на основе моделирования МКЭ процесса врезания отдельным зерном в обрабатываемый материал при шлифовании;
2. Математическое моделирование процесса плоского шлифования инструментом с равномерным распределением абразивных зерен, расположенных на одной дорожке;
3. Разработка стохастической модели динамики процесса плоского шлифования инструментом с абразивными зёрнами случайным образом распределёнными по поверхности шлифовального круга с учетом случайного характера геометрических параметров зерен;
4. Моделирование образования текстуры поверхности после обработки, расчет изменения сил резания, динамических отклонений инструмента / детали и их спектральных характеристик в зависимости от режимов обработки;
5. Анализ спектральных характеристик динамической системы шлифования при различных соотношениях жесткостей крепления инструмента или детали, и на их основе определение жесткости динамической системы, при которой возбуждаются автоколебания типа «chatter».

Методы исследования. При моделировании процесса плоского шлифования

используется МКЭ для расчета НДС в материале заготовки при врезании отдельным зерном. Для анализа динамической модели использованы известные методы численного решения дифференциальных уравнений во времени с учетом переменного запаздывания.

Научная новизна:

1. На основе моделирования НДС процесса микро-резания отдельным зерном при шлифовании с помощью МКЭ, с учетом теплового нагружения, больших уровней и скоростей деформирования, вплоть до разделения материала с образованием стружки разработана методика расчета сил резания в зависимости от глубины врезания зерна;
2. Разработана новая стохастическая модель, позволяющая исследовать динамику процесса плоского шлифования при заданных режимах обработки;
3. Предложена методика оценки качества обработки с учетом деформируемости технологической системы, на основе моделирования динамики инструмента и детали при шлифовании;
4. Путем моделирования установлено, что учет деформируемости системы позволяет определить параметры обработки, при которых возбуждаются автоколебания за счет механизма регенеративного возбуждения.

Достоверность результатов работы обоснована использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики. Результаты моделирования сил резания подтверждаются данными экспериментальных исследований.

Практическая значимость работы заключается в следующих результатах:

1. Разработана методика расчета коэффициентов сил резания при микро-резании, на основе разработанной МКЭ модели с использованием программного обеспечения (ПО) ABAQUS, с анализом результатов в среде MATLAB.
2. Разработана методика и программное обеспечение для оценки качества обработки по результатам моделирования при заданных режимах обработки, с учетом динамического поведения системы в процессе шлифования, а также предложен подход к выбору рациональных режимов обработки.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Результаты исследования НДС обрабатываемого материала при врезании абразивного зерна с различной геометрией.
2. Разработанные модели расчета сил резания при микро-резании отдельным зерном в зависимости от режимов врезания.
3. Разработанные модели динамики инструмента и детали в процессе шлифования с учетом взаимодействия отдельных зерен в процессе врезания.
4. Методика расчета погрешностей формы и микронеровностей, образованных после прохождения шлифовального круга с учетом динамики деформируемой технологической системы и стохастического распределения геометрических параметров абразивных зерен.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы и разработанное программное обеспечение внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана и в практику проектирования в АО «МСЗ-САЛЮТ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и были одобрены на научном семинаре кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Москва, 2015 г.); на конференции «Vibroengineering-2016 / Special Topic: Dynamics of Strong Nonlinear Systems» (г. Москва, 2016 г.); на конференции «Механика и математическое моделирование в технике» (г. Москва, 2017 г.); на конференции «Машиноведение и инновации. XXIX Конференция молодых ученых и студентов» (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, из них 6 статей в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 2 статьи из Перечня международных научных изданий включенных в базу данных Web of Science и Scopus, общий объем 2,16 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка используемой литературы. Общий объем 152 страницы, в том числе 109 рисунков и 18 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и сформулированы защищаемые положения.

В первой главе проведен обзор существующих методов для моделирования процесса шлифования. Рассмотрены общие положения о состоянии исследования процесса обработки шлифованием. Приведен обзор публикаций по моделированию процесса шлифования отдельным зерном с помощью МКЭ, а также посвященных исследованию влияния динамики технологической системы на качество обработки. Отмечена необходимость создания стохастической динамической модели шлифования с учетом податливости инструмента и детали.

Вторая глава посвящена моделированию внедрения в обрабатываемый материал отдельным абразивным зерном конической формы и врезания зерном пирамидальной формы при шлифровании. Процесс шлифования происходит при высоком давлении и температуре. Абразивное зерно моделируется как конус или пирамида со скругленной вершиной (Рис. 1), которая врезается в материал как режущий клин. Для упрощения, траектория движения зерна заменяется на путь, состоящий из прямолинейных отрезков (Рис. 2). При моделировании, зерно может иметь различный угол β наклона оси Y пирамиды. Таким образом моделируется процесс микро-резания зерном с различными передними углами γ .

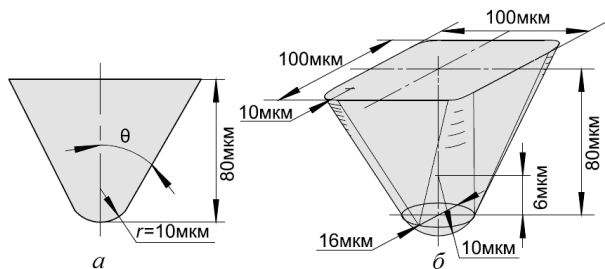


Рис. 1. Геометрическая схема зерна конусной (а) и пирамидальной (б) формы

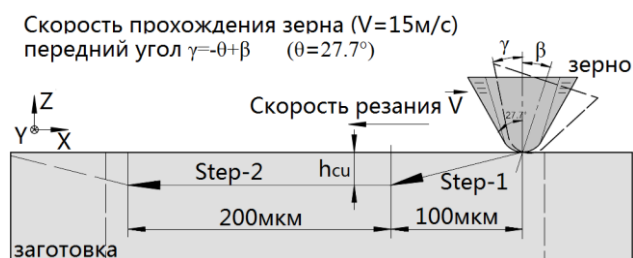


Рис. 2. Схема маршрута зерна в процессе резания

Поведение материала заготовки определяется с помощью термо-упруго-пластической модели «Джонсона-Кука», которая связывает эквивалентное напряжение со скоростью деформации, температурой и уровнем пластической деформации соотношением:

$$\sigma = (A + B\overline{\varepsilon}_{pl}^n)[1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 - (\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}})^m] \quad (1)$$

где σ – эквивалентное напряжение, $\overline{\varepsilon}_{pl}$ – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}$ – фактическая скорость деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ – базовая эффективная скорость деформации, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0c^{-1}$, T_{ref} – базовая (комнатная) температура, T_{melt} – температура плавления материала, A – коэффициент в характеристике, имеющий размерность напряжения, $A \approx \sigma_T$ (предел текучести материала), B – коэффициент характеристики, имеющий размерность напряжения, n – показатель степени влияния пластической деформации, C – коэффициент зависимости влияния скорости деформации (безразмерный), m – коэффициент теплового размягчения (безразмерный).

При моделировании деформирования материала предполагается использование модели суммирования накопленных повреждений D :

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе, на i -ом шаге интегрирования по времени; ε_f – критическая накопленная деформация, в качестве критерия поврежденности материала, определяемая по формуле (3) согласно модели разрушения «Johnson-Cook»:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \frac{p}{\bar{\sigma}})][1 + D_4 \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 + D_5 (\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}})] \quad (3)$$

где p – гидростатическое давление, $\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение по Мизесу, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – параметры повреждения, которые показывают влияние деформации, скорости деформации и температуры на повреждения материала.

Расчет проводится с помощью ПО ABAQUS, в котором разрушение конечных элементов (КЭ) происходит, если параметр поврежденности D становится равным единице. Материал заготовки выбран титановый сплав *Ti6Al4V*. Трение между материалом и зерном описывается по закону Кулона, коэффициент трения $\mu=0,3$. В работе, применяется подход Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) для сетки КЭ. В подходе ALE сетка КЭ не является пространственно фиксированной, и не прикреплена к материалу детали. Сетка следует с потоком материала, для определения перемещений решается задача в подходе Лагранжа. На каждой итерации сетка перестраивается, и решается задача определения скоростей в подходе Эйлера. Таким образом, исключается значительное искажение элементов сетки. В модели выбран тип элемента заготовки C3D8RT, который является восьми-узловым линейным прямоугольным параллелепипеидальным элементом, с учётом деформирования и температуры. Общее количество элементов – 210540. Зерно рассматривается как жёсткое тело.

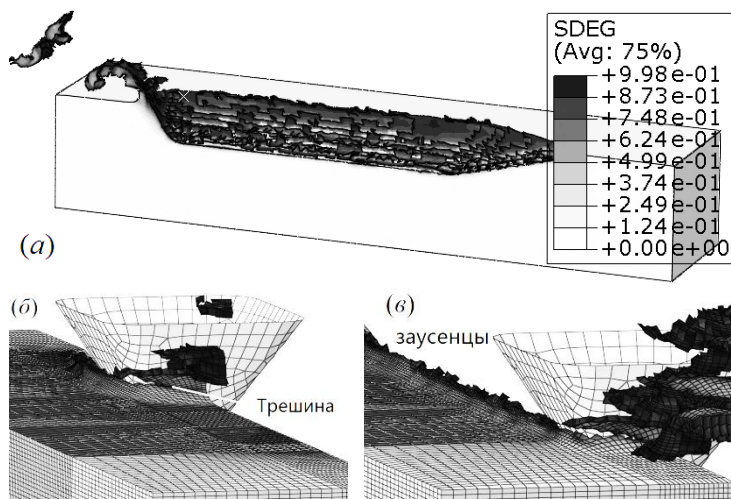


Рис. 3. Распределение параметра разрушения ($SDEG$) при моделировании (а), увеличенное изображение элементов образованной стружки в конце шага-1 (б) и шага-2 (в)

к единице, и материал под передней поверхностью зерна разделяется, отделяя стружку (Рис. 3).

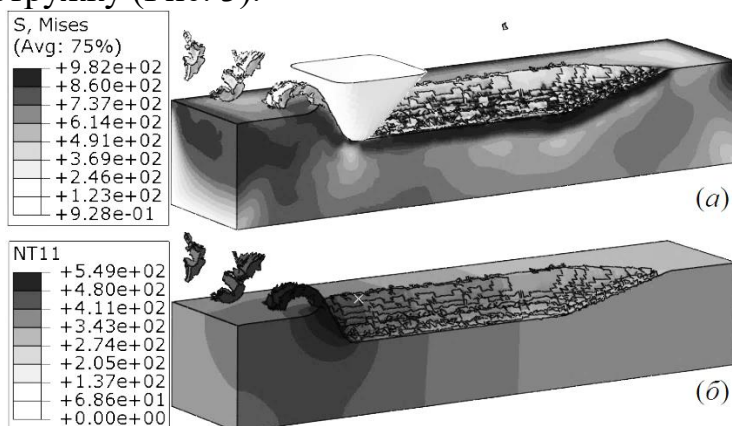


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений и температуры в материале заготовки в процессе стружкообразования ($h_{cu}=40\text{мкм}$, $\gamma=0^\circ$)

$h_{cu}=10\div 60\text{мкм}$. Результаты, показали, что при увеличении h_{cu} температура материала тоже растет, а напряжение начала текучести уменьшается, согласно термомеханической модели материала «Johnson-Cook».

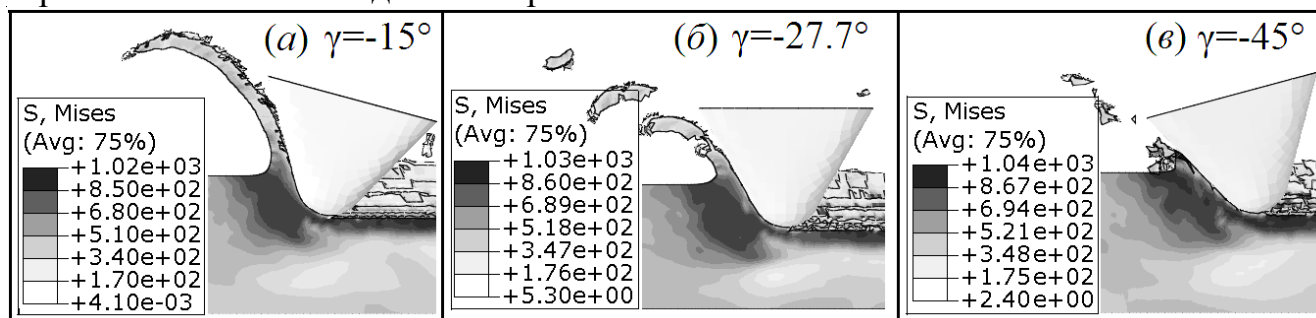


Рис. 5. Стружкообразование при различных передних углах γ ($h_{cu}=30\text{мкм}$): а – сливая стружка; б – элементная стружка; в – стружка с надломами

При моделировании резания металла, для устойчивости работы алгоритма сильно-искаженные элементы удаляются из модели в зависимости от значения показателя степени разрушения Scalar stiffness degradation ($SDEG$). Удаление элемента происходит при условии, когда рассчитанное значения деградации $SDEG$ (D) на данный момент интегрирования достигает единицы. Значительные искажения КЭ в расчетах не наблюдались. Вблизи передней поверхности зерна параметр разрушения D становится близким

к единице, и материал под передней поверхностью зерна разделяется, отделяя стружку (Рис. 3).

Распределение эквивалентного напряжения по Мизесу и температуры, полученные путем моделирования, показаны на Рис. 4. Материал выдавливается из заготовки в зоне перед зерном, скользит по его поверхности, и отделяется с формированием стружки.

Для того, чтобы определить зависимость сил резания (F_t , F_n) от площади врезания (A_h), были выполнены расчеты при различных толщинах резания

Из Рис. 5, видно, что значение переднего угла γ является одним из определяющих факторов формы срезаемой стружки. Для резания зерном с большим передним углом, объём сегментированной стружки уменьшается, и напряжения и температура в материале увеличиваются.

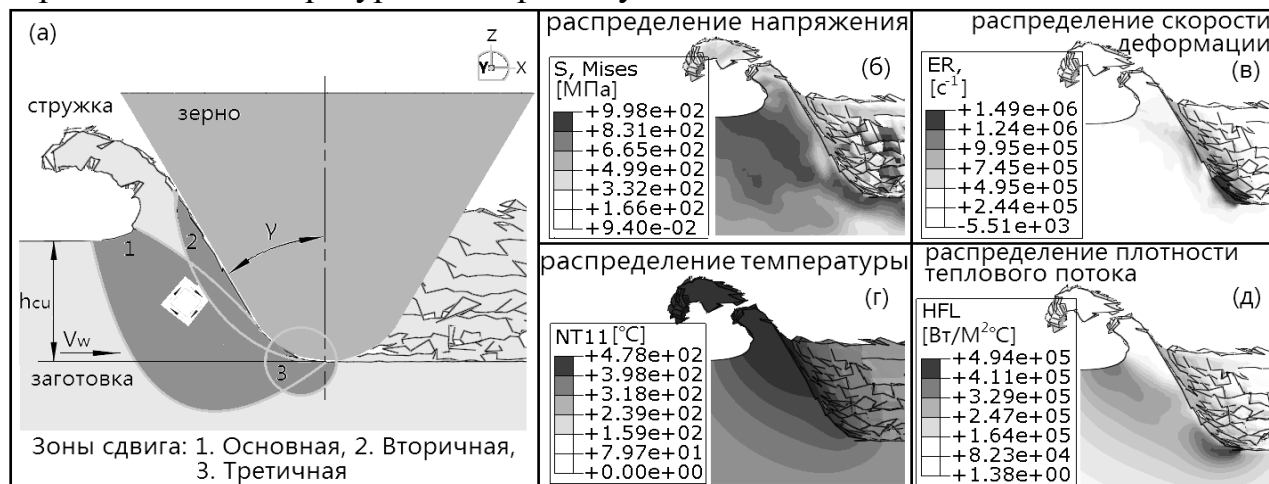


Рис. 6. Схема зоны сдвига в процессе микро-резания отдельным зерном – (а), и полученная в результате моделирования ($h_{cu} = 30$ мкм, $\gamma = -27.7^\circ$) – (б-д)

В результате НДС можно выделить 3 зоны с максимальными пластическими деформациями (Рис. 6): 1–Основная (сдеформированный материал над зерном смещается вдоль передней поверхности, формируется стружка); 2–Вторичная (слой, контактирующий с передней поверхностью, преодолевая трение, выдавливается и проскальзывает); 3–Третичная (в контакте с вершиной небольшая часть металла, выдавливается и деформируется, после прохождения наблюдается упругое последствие, на поверхности образуется поле остаточных напряжений).

Проведем анализ результатов расчета сил резания МКЭ при различных h_{cu} и различных γ . Поперечное сечение контакта зерна и материала (A_c) имеет нерегулярную конфигурацию (Рис. 7, б), т.е. его площадь трудно измерять. В динамической модели, лучше определять зависимость сил резания от площади врезания A_h , которая связана с толщиной резания h_{cu} (Рис. 7, в).

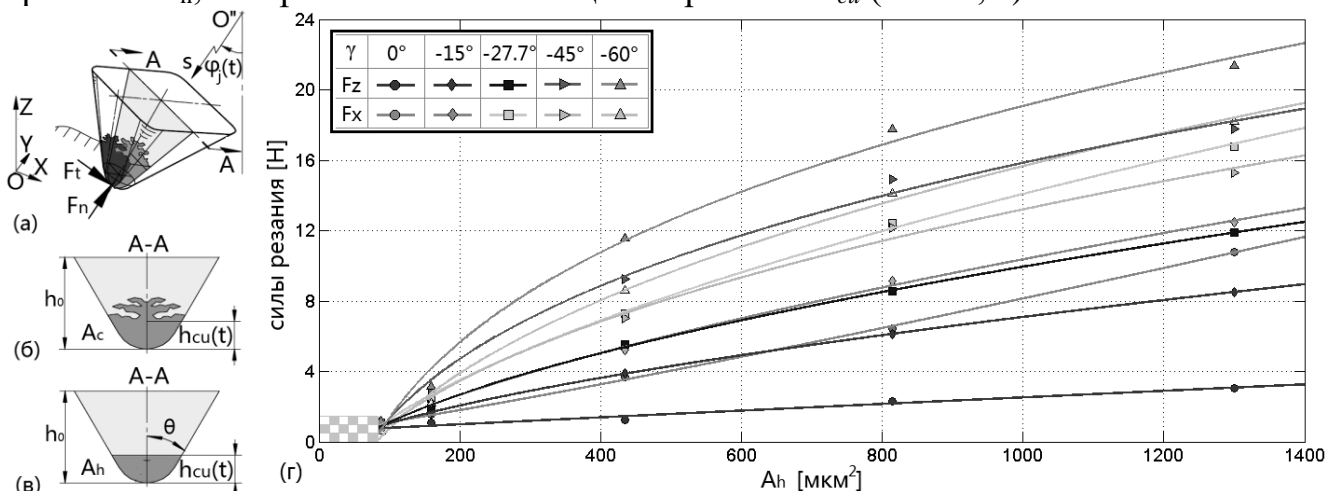


Рис. 7. Схема преобразования зерна в динамической модели (а); Определение площади поперечного сечения контакта зерна и материала A_c (б), площади врезания A_h (в); Зависимость сил резания от A_h ($h_{cu} \geq r_0 = 10$ мкм) (г)

На Рис. 7, z показана зависимость сил резания от площади врезания A_h при различных передних углах γ . Кривые интерполяции можно описать в виде степенной функции по формулам (4):

$$F_t = [C_{t,1}(\frac{A_h}{A_0})^{C_{t,2}} + C_{t,3}] \sigma_T A_0, \quad F_n = [C_{n,1}(\frac{A_h}{A_0})^{C_{n,2}} + C_{n,3}] \sigma_T A_0 \quad (4)$$

где F_t , F_n – касательная, нормальная силы резания, A_h – площадь врезания, A_0 – характерная площадь, используемая для обезразмеривания ($A_0=86.7 \text{ мкм}^2$). σ_T – предел текучести материала *Ti6Al4V* ($960 \div 1180 \text{ МПа}$), $\sigma_T=1000 \text{ МПа}$. $C_{t,1}$, $C_{t,2}$, $C_{t,3}$, $C_{n,1}$, $C_{n,2}$, $C_{n,3}$ – коэффициенты сил резания.

Случай, когда h_{cu} меньше чем радиус вершины ($r_0=10 \text{ мкм}$), должен быть исследован отдельно из-за другого механизма (царапание и скольжение). На Рис. 8 показаны результаты внедрения без стружкообразования коническим зерном.

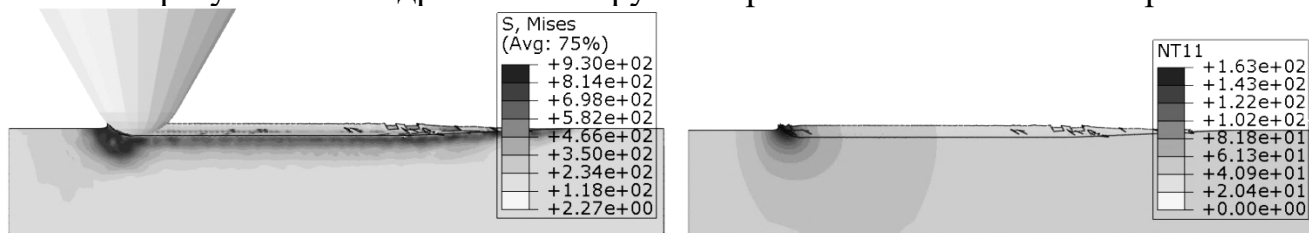


Рис. 8. Распределение напряжений и температуры в материале при $h_{cu}=5 \text{ мкм}$

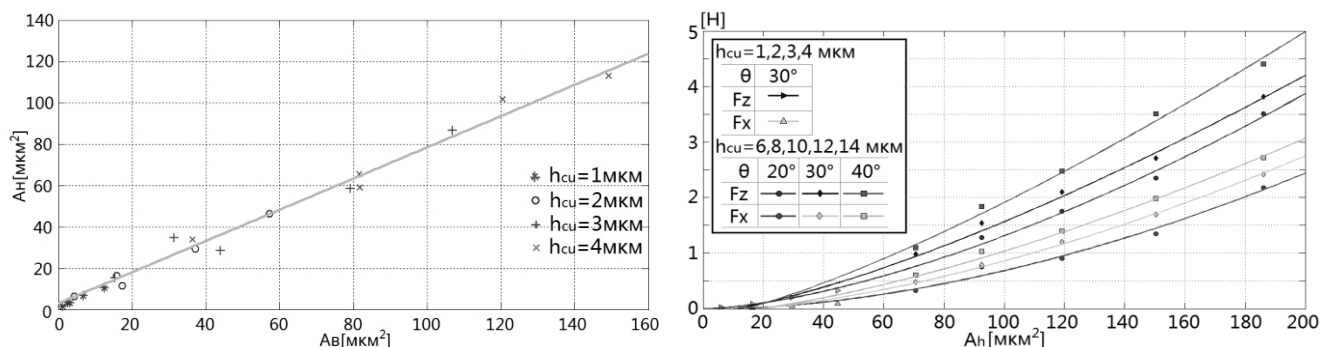


Рис. 9. Зависимость площади сечения наплыва A_n от площади сечения впадины A_B (а): зависимость сил резания от A_h при внедрении без стружкообразования (б)

Измерения площадей сечения впадины (A_B) и наплыва (A_n) в различных профилях, показали, что между ними существует линейная зависимость, которая в процессе стружкоотделения не выполняется (Рис. 9, а). Зависимость сил резания от A_h при внедрении без стружкообразования (Рис. 9, б), тоже описывается в виде

степенной функций (формула (4)), но с другими коэффициентами. Полученные соотношения для сил резания далее используются для моделирования динамики плоского шлифования.

В третьей главе построена упрощенная математическая модель динамики процесса плоского шлифования с помощью ПО MATLAB. Введем следующие предположения: 1, Шлифовальный круг движется в

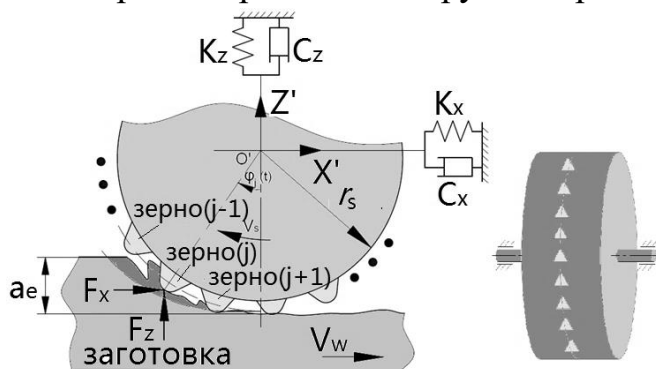


Рис. 10. Расчетная схема упрощенной модели плоского шлифования

плоскости как твердое тело на упругих опорах с заданной жесткостью и демпфированием; 2, Абразивные зерна равномерно распределены по поверхности круга, и расположены в один ряд; 3, Все зерна имеют одинаковые геометрические размеры (Рис. 10).

При моделировании не рассматриваются крутильные колебания круга, т.е. угловая скорость вращения ω постоянна. Используя результаты из главы 2, будем считать, что толщина резания h_{cu} , площадь врезания A_h , являются ключевыми переменными, влияющими на силы резания, а остальные параметры заданы в Таблице 1.

Таблица 1.

Исходные данные упрощённой модели плоского шлифования

Угловая скорость круга ω	150 рад/с	Скорость подачи V_w (с)	250 мм/с
Радиус круга r_s	105 мм	Глубина резания a_e	0.2 мм
Количество зерен на дорожке N	5000	Количество зерен в зоне контактана одной дорожке n	$\frac{\arccos((r_s - a_e)/r_s)}{2\pi} \times N \approx 49$

Вводим три системы координат: глобальная $OXYZ$, относительная $O'X'Y'Z'$, полярная (ρ, θ) . Чтобы анализировать влияние резания предыдущим зерном на формирование поверхности текущим зерном, выберем j -ое и $(j-1)$ -ое зерно, находящиеся в контакте в моменты t (Темный) и $(t-T/N)$ (Светлый), (T/N) – период прохождения зерна, $T=2\pi/\omega$ (Рис. 11).

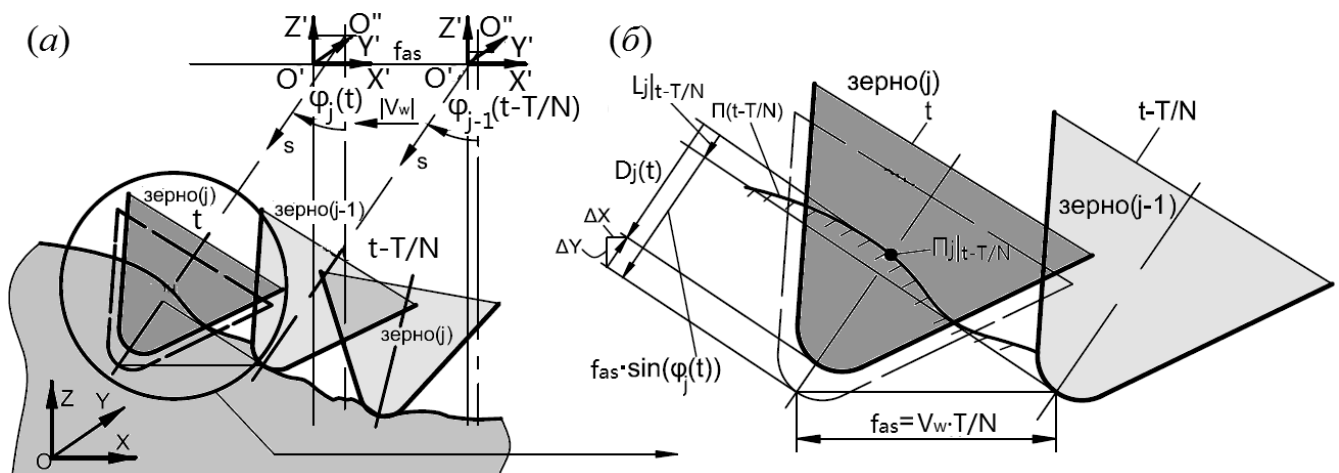


Рис. 11. (а) Системы координат и положение $(j-1)$ -ого, j -ого зерен при резании; (б) Геометрические соотношения, описывающие процесс резания $(j-1)$ -ого, j -ого зерен

Систему уравнений описывающих формирование новых поверхностей запишем в виде (5):

$$\begin{cases}
 D_j(t) = [L_j|_{t-T/N} + V_w \cdot T/N \cdot \sin(\varphi_j(t)) - \Delta x \cdot \sin(\varphi_j(t)) - \Delta z \cdot \cos(\varphi_j(t))] \cdot g(\varphi_j(t)) \\
 h_{cu,j}(t) = \max(0, D_j(t)) \\
 \Pi(t) = Trend[\Pi_j|_{t-T/N} - h_{cu,j}(t)] \\
 L_j|_0 = 0 \\
 g(\varphi_j(t)) = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \varphi_j(t) \leq \varphi_{ex} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{cases} \quad (5)$$

где $L_j|_{t-T/N}$ – отклонение в полярной системе координат от поверхности заготовки в момент времени $t-T/N$ для j -ого зерна только за счет поворота круга на $\Delta\varphi = \omega T/N$; $P(t)$ – координаты поверхности, записанные в информационном банке данных в ПО MATLAB; $\Delta x, \Delta z$ – проекции динамического смещения на оси X, Z ; φ_j – мгновенное угловое погружение j -ого зерна, измеряется по часовой стрелке от нормальной оси (Z), меняющееся во времени как $\varphi_j(t) = 2\pi \cdot (n-j) / N + \omega \cdot t$ при вращение круга с угловой скоростью ω ; $D_j(t)$ – расстояние от j -ой режущих кромок до необработанной поверхности, которая состоит из статической части $L_j|_{t-T/N} + V_w \cdot T / N \cdot \sin(\varphi_j(t))$, и динамической части $\Delta x \cdot \sin \varphi_j + \Delta z \cdot \cos \varphi_j$; $h_{cu,j}(t)$ – толщина резания j -ого зерна в момент времени t , $\max(0, D_j(t))$ – функция, которая равна максимальному из 0 и $D_j(t)$, т.е. $h_{cu,j}(t)$ не может быть отрицательной; $P_j|_{t-T/N}$ – положение точки пересечения между осью j -ого зерна в момент времени t , и поверхностью заготовки в момент времени $t-T/N$ в полярной системе координат; $Trend[]$ – функция, интерполирующая значения по точкам заданным в массиве; $g(\varphi_j(t))$ – функция, определяющая находится ли j -ое зерно в зоне контакта; φ_{ex} – угол выхода зерна из погружения в материал. Для решения задачи при абсолютно жестком креплении инструмента вибрации не учитываются, т.е. динамическая часть $\Delta x=0, \Delta z=0$.

Преобразуем составляющие сил резания отдельным зерном $F_{t,j}$, $F_{n,j}$ в системе координат $OXYZ$, к силам $F_{x,j}$ и $F_{z,j}$ (проекции сил резания на оси X, Z), используя соотношения между ними следующим образом:

$$F_{x,j} = F_{t,j} \cdot \cos \varphi_j + F_{n,j} \cdot \sin \varphi_j, \quad F_{z,j} = -F_{t,j} \cdot \sin \varphi_j + F_{n,j} \cdot \cos \varphi_j \quad (6)$$

Суммируя силы резания, получаем силы, действующие на шлифовальный круг:

$$F_x = \sum_{j=1}^n F_{x,j}, \quad F_z = \sum_{j=1}^n F_{z,j} \quad (7)$$

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение системы имеет вид:

$$m \cdot \ddot{x} + C_x \cdot \dot{x} + K_x \cdot x = F_x, \quad m \cdot \ddot{z} + C_z \cdot \dot{z} + K_z \cdot z = F_z \quad (8)$$

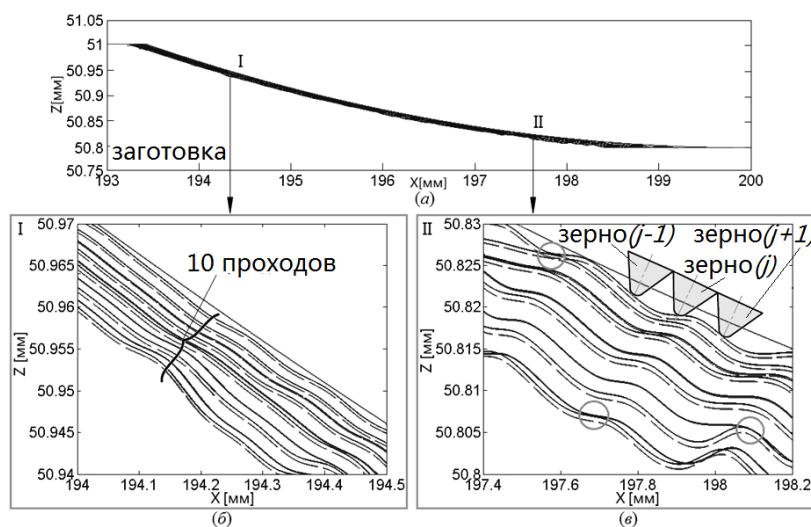


Рис. 12. Сравнение конфигурации поверхности заготовки в интервале времени от $t=0$ до $t=10 \cdot T/N$, с учётом и без учёта вибрации

где m – масса шлифовального круга. C_x, C_z – демпфирования крепления инструмента. K_x, K_z – жёсткости крепления инструмента. Жесткость связующего материала в расчетах не учитывается. При проведении расчетов принимаем: $m = 0.5$ кг, $C_x = 387.2$ кг/с, $C_z = 387.2$ кг/с, $K_x = 30$ кН/мм, $K_z = 30$ кН/мм.

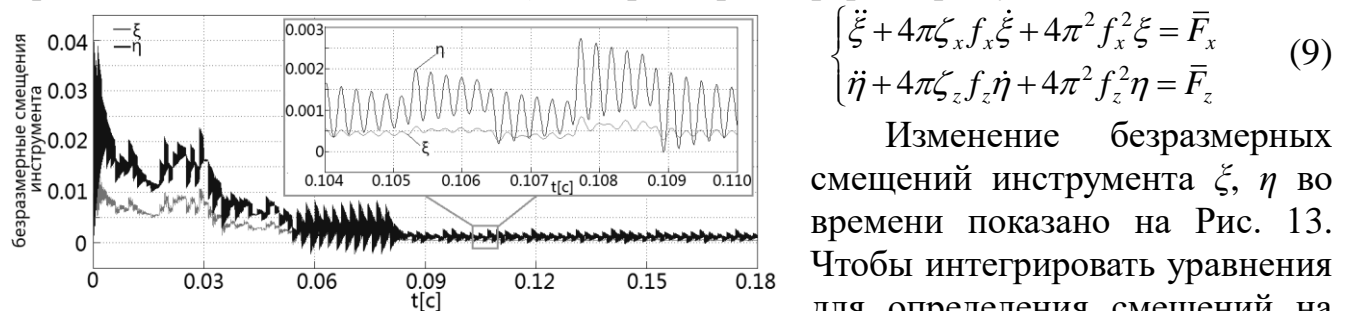
Сравнение конфигурации поверхности заготовки $P(t)$ (сплошные) с учётом вибрации и поверхности $P'(t)$ (штриховые) без учёта

вибрации после нескольких проходов зерен представлено на Рис. 12, а, где наблюдаем влияние упругого отжатия круга при упругом закреплении. В увеличенном виде участки I и II показаны на Рис. 12, б-в, откуда видно, что существует несколько зон выделенных окружностями, в которых смежные поверхности пересекаются, то есть в данном случае, $h'_{cu,j}=0$, т.е. зерна не срезают материал заготовки.

Введем следующие безразмерные переменные и обозначения (h_0 - высота зерна):

$$\xi = \frac{x}{h_0}, \eta = \frac{z}{h_0}, t = T \cdot \tau, f_x = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{m}}, f_z = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}}, \zeta_x = \frac{C_x}{2\sqrt{K_x \cdot m}}, \zeta_z = \frac{C_z}{2\sqrt{K_z \cdot m}}, \bar{F}_x = \frac{F_x}{m \cdot h_0}, \bar{F}_z = \frac{F_z}{m \cdot h_0}$$

Уравнения движения системы (8) в безразмерной форме примут вид:



$$\begin{cases} \ddot{\xi} + 4\pi\zeta_x f_x \dot{\xi} + 4\pi^2 f_x^2 \xi = \bar{F}_x \\ \ddot{\eta} + 4\pi\zeta_z f_z \dot{\eta} + 4\pi^2 f_z^2 \eta = \bar{F}_z \end{cases} \quad (9)$$

Изменение безразмерных смещений инструмента ξ, η во времени показано на Рис. 13. Чтобы интегрировать уравнения для определения смещений на $(j+1)$ -ом периоде прохождения зерна, необходимо учитывать положение поверхности, которая сформирована на j -ом периоде прохождения зерна.

При этом амплитуда колебаний уменьшается, смещения инструмента постепенно стабилизируются.

В результате моделирования получена форма обработанной поверхности заготовки после прохождения круга, исследовано динамическое поведение инструмента с учётом податливости круга. Показано, что при определенных режимах в системе могут возбуждаться регенеративные колебания типа «chatter». Однако данная модель не позволяет оценить качество всей поверхности детали, образуемой всеми абразивными зёрнами осуществляющими формирование поверхности. Для полного имитационного моделирования нужна распределенная модель инструмента с абразивными частицами, расположенными по всей поверхности круга.

В четвертой главе представлена стохастическая модель, позволяющая исследовать динамику процесса плоского шлифования. Шлифование можно рассматривать как процесс фрезерования с большим количеством режущих кромок. При моделировании, процесс обработки представляется как микро-резание абразивными зёрнами случайным образом распределенными по поверхности шлифовального круга. Введем следующие предположения:

1. Абразивные зёрна равномерно распределяются по дорожкам на поверхности круга, таким образом, что центральный угол между осями соседних зерен является одинаковым (Рис. 14, б). Такой характер распределения даёт возможность при моделировании описывать движение системой дифференциальных уравнений с постоянным запаздыванием по углу поворота $\Delta\varphi$ за время T/N (время прохождения одного зерна), при этом для координат

поверхности время запаздывания будет переменным.

2. Все зерна обладают случайными геометрическими характеристиками. Предполагаем, что высота зерен h_0 и угол рыскания зерен α случайны и описываются законом нормального распределения. Конусный угол зерна θ по существу является передним углом зерна γ с обратным знаком. Будем считать, что γ имеет сильно-асимметричное распределение Рэля. Вводим угловое смещение расположения зерен между дорожками δ , считаем, что оно меняется по закону равномерного распределения (Рис. 15).

Исходные данные показаны в Таблице 1, ширина круга $b=5\text{мм}$, количество дорожек $N^*=50$. При моделировании не рассматриваются крутильные колебания круга, угловая скорость вращения ω постоянна, и не изменяется за счет вибраций.

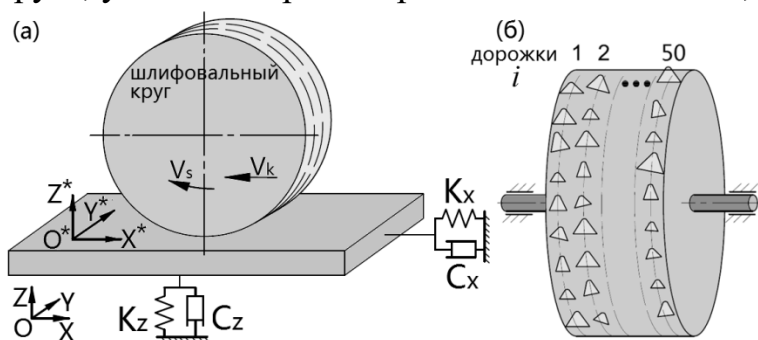


Рис. 14. Динамическая схема моделирования обработки пластины при шлифовании с учетом податливости детали (а) и стохастическая модель шлифовального круга (б)

плоская, имеющая две ортогональные степени свободы, угловые смещения в плоскости незначительны (Рис. 14, а). Предполагаем, что круг жестко закреплен. Силы резания, которые возникают при врезании в материал заготовки, представим в виде составляющих по направлению подачи (X) и по нормали (Z). Вводим еще одну подвижную систему координат $O^*X^*Y^*Z^*$, связанную с заготовкой.

Для моделирования процесса шлифования с учетом податливости инструмента, предполагаем, что шлифовальный круг движется в плоскости как твердое тело на упругих опорах с заданной жесткостью и демпфированием (Рис. 10). Для моделирования процесса шлифования мало жестких деталей также система схематизируется как

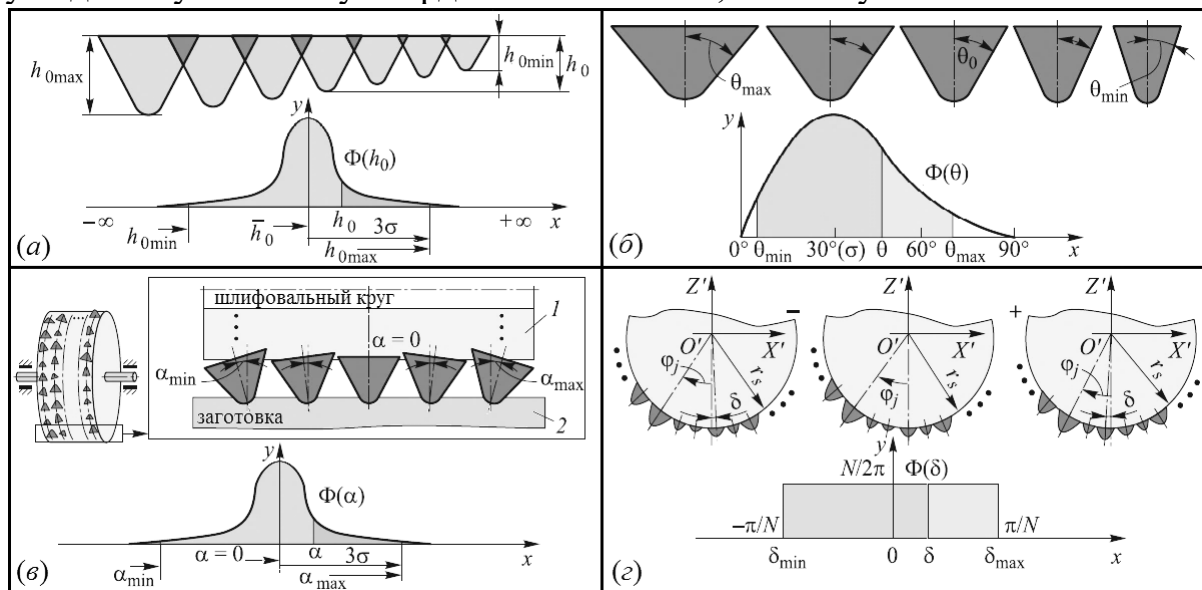


Рис. 15. Схемы распределения и графики функции вероятности для разных параметров: а – высоты зерен h_0 ; б – конусного угла зерен θ ; в – угла рыскания зерен α ; г – углового смещения дорожки δ

При моделировании процесса шлифования с учетом податливости инструмента, чтобы анализировать влияние резания предыдущего зерна на текущее зерно, выберём j -ое и $(j-1)$ -ое зерно на i -ой дорожке, которые находятся в контакте круга и заготовки в моменты времени t (Темный) и $(t-T/N)$ (Светлый) (Рис. 16). Для j -ого зерна полярный угол, $\theta_j(t) = -\varphi_j(t) - \pi/2$. Мгновенное угловое погружение j -ого зерна на i -ой дорожке с учетом углового смещения дорожки зерен, измеряется по часовой стрелке от нормальной оси (Z), $\varphi_j(t) = \delta_i + 2\pi \cdot (n-j)/N + \omega \cdot t$, при вращении круга с угловой скоростью ω .

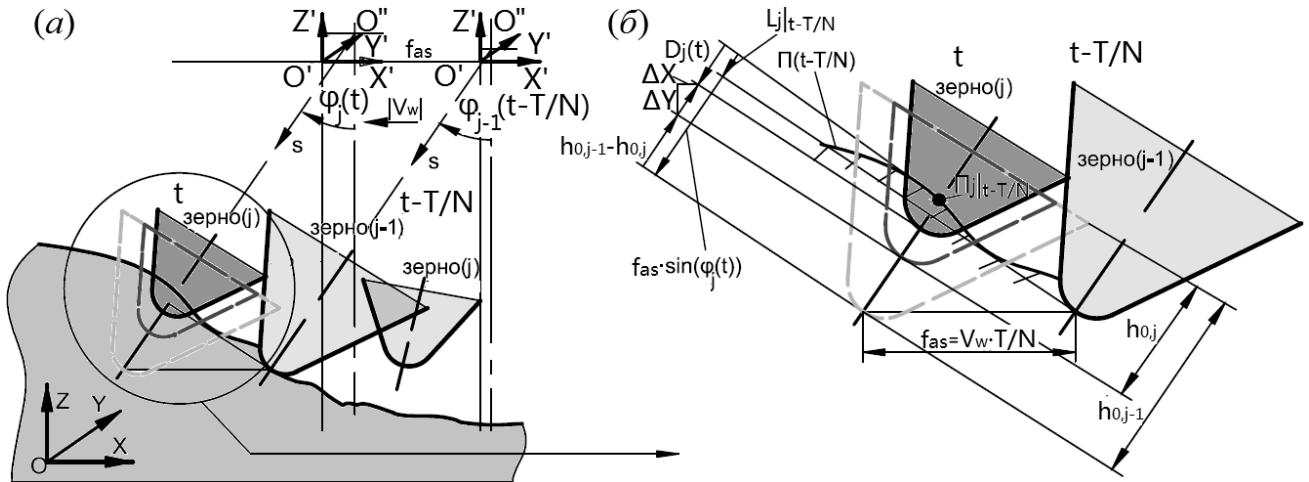


Рис. 16. (а) Система координат и положение при резании $(j-1)$ -ого и j -ого зерен на i -ой дорожке при резании; (б) Геометрический анализ формирования поверхности для процесса резания $(j-1)$ -ого, j -ого зерен

На Рис. 16, б показаны геометрические соотношения для формирования новой поверхности. Систему уравнений описывающих формирование новых поверхностей для каждой дорожки запишем в виде (10):

$$\begin{cases} D_j(t) = [L_j|_{t-T/N} + V_w \cdot T/N \cdot \sin(\varphi_j(t)) - \Delta x \cdot \sin(\varphi_j(t)) - \Delta z \cdot \cos(\varphi_j(t)) - (h_{0,j-1} - h_{0,j})] \cdot g(\varphi_j(t)) \\ h_{cu,j}(t) = \max(0, D_j(t)) \\ \Pi(t) = Trend[\Pi_j|_{t-T/N} - h_{cu,j}(t)] \\ L_j|_0 = 0 \\ g(\varphi_j(t)) = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \varphi_j(t) \leq \varphi_{ex} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

где, в отличие от ур-ий (5), для $D_j(t)$ добавлены величины радиальной разницы высоты смежных зерен $(h_{0,j-1} - h_{0,j})$, $h_{0,j}$ – высота j -ого зерна, $h_{0,j-1}$ – высота $(j-1)$ -ого зерна. Для моделирования процесса шлифования с учетом податливости детали, разница заключается в том, что здесь для интерполяция новой поверхности $\Pi(t)$ необходимо учитывать динамическое смещение заготовки. Таким образом, в системе уравнений (10) описывающих формирование новых поверхностей изменяется только одно уравнение:

$$\Pi(t) = Trend[\Pi_j|_{t-T/N} - h_{cu,j}(t) + \Delta x \cdot \sin(\varphi_j(t)) + \Delta z \cdot \cos(\varphi_j(t))] \quad (11)$$

Для хранения изменения толщины резания всех зерен, используем переменный массив $h_{cu,ij}(t)$. После определения профиля $\Pi(t)$ по всем дорожкам,

интерполируем кривые линии с помощью функции «surf» в ПО MATLAB для визуализации поверхности в трехмерном отображении. Используя результаты из главы 2, будем считать, что толщина резания h_{cu} и площадь врезания A_h , являются ключевыми переменными, влияющими на силы резания для отдельных зерен. Суммируя силы резания для зерен находящихся в контакте с заготовкой, получаем

силы, действующие на инструмент:

$$F_x = \sum_{i=1}^{N^*} \sum_{j=1}^n F_{x,ij}, F_z = \sum_{i=1}^{N^*} \sum_{j=1}^n F_{z,ij} \quad (12)$$

где n – количество зерен в зоне контакта на одной дорожке ($n=49$), N^* – количество дорожек ($N^*=50$). Введем следующие безразмерные переменные и обозначения для получения уравнения в безразмерной форме:

$$\xi = \frac{x}{h_0}, \eta = \frac{z}{h_0}, t = T \cdot \tau, f_x = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{m}}, f_z = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}}, \zeta_x = \frac{C_x}{2\sqrt{K_x \cdot m}}, \zeta_z = \frac{C_z}{2\sqrt{K_z \cdot m}}, \bar{F}_x = \frac{F_x}{m \cdot h_0}, \bar{F}_z = \frac{F_z}{m \cdot h_0}$$

где \bar{h}_0 – математическое ожидание высоты зерна, τ – безразмерное время.

Для случая когда податливость системы в основном определяется за счет податливости инструмента, а деталь считается абсолютно жесткой, уравнения динамики имеют вид (9), в которых в правой части силы резания определяются по соотношениям (12). Когда податливость системы в основном определяется за счет податливости детали, а инструмент считается абсолютно жестким, уравнения имеют вид:

$$\ddot{\xi} + 4\pi\zeta_x f_x \dot{\xi} + 4\pi^2 f_x^2 \xi = -\bar{F}_x, \quad \ddot{\eta} + 4\pi\zeta_z f_z \dot{\eta} + 4\pi^2 f_z^2 \eta = -\bar{F}_z \quad (13)$$

где ξ, η – безразмерные смещения детали, ζ_x, ζ_z – коэффициенты демпфирования. f_x, f_z – безразмерные собственные частоты колебаний детали.

Расчеты для двух различных схем закрепления (Рис.10 и Рис.14) аналогичны поэтому результаты, приведенные ниже, могут быть использованы как для одной, так и для другой схемы. Ниже приведены расчеты с учетом податливости инструмента, соответствующие Рис. 10. На Рис. 17 показано изменение безразмерных смещений инструмента ξ, η при различных жёсткостях крепления инструмента. Источником возбуждения являются и

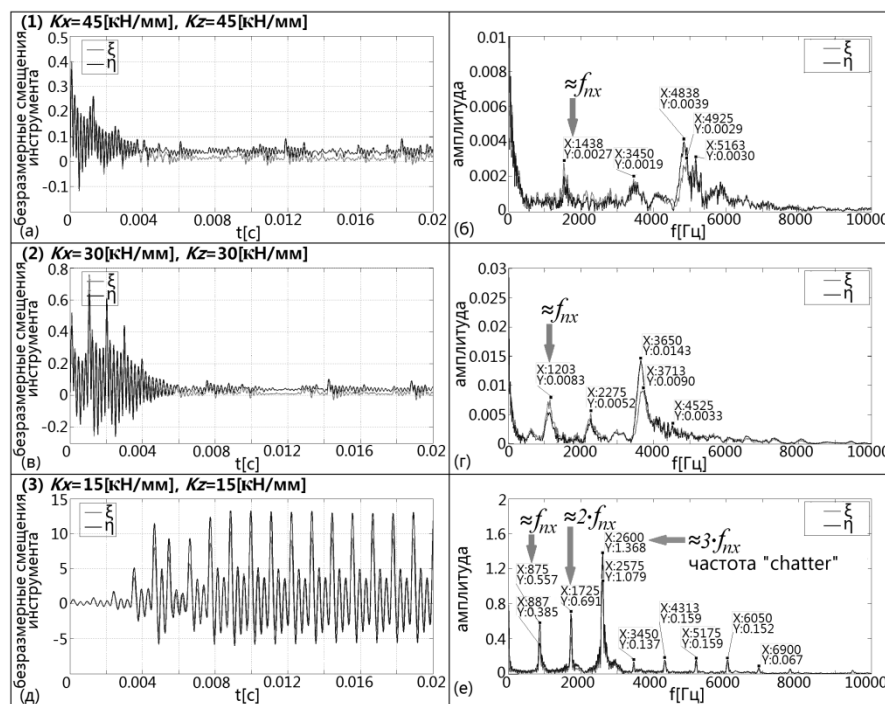


Рис. 17. Изменение ξ, η от времени t , и их спектр: (а,б) – $K_x=45$ кН/мм; (в,г) – $K_x=30$ кН/мм; (д,е) – $K_x=15$ кН/мм

и периодические врезания зубьев, а также регенеративный механизм. Видно, что для случая $K_x=45$ кН/мм колебания в системе затухают, поведение стабильное, такие режимы дают хорошее качество поверхности. Для случая $K_x=30$ кН/мм, после переходного

процесса, система выходит на установившийся режим. Данный режим можно считать удовлетворительным. Для случая $K_x=15\text{кН/мм}$ наблюдаются колебания с большой амплитудой, величина которых превосходит размер зерен, что говорит о неработоспособности таких режимов. Кроме того, изменение спектров Фурье безразмерных перемещений показало, что для случая K_x с большими значениями ($K_x > 45 \text{ кН/мм}$) спектр колебаний системы распределен в широкой полосе частот. При уменьшении значений жесткости K_x , спектр имеет более дискретный характер с ярко выраженными пиками на отдельных частотах, связанных кратными числами с частотой собственных колебаний. Таким образом можно зафиксировать появление регенеративных колебаний типа «chatter», в этом случае частота «chatter» является доминирующей в спектре.

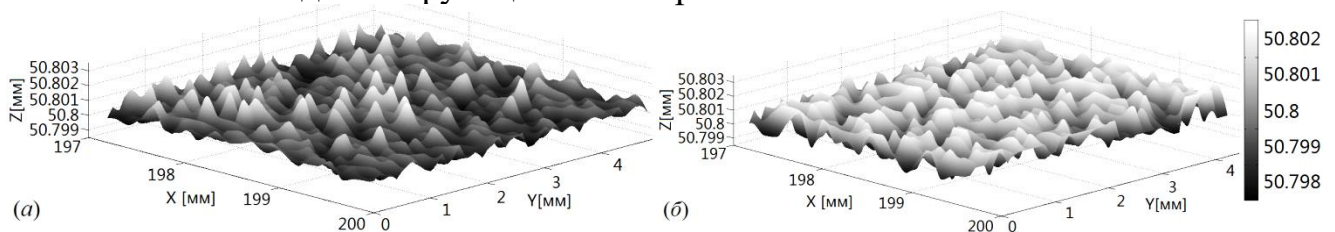


Рис. 18. Текстуры обработанной поверхности заготовки при моделировании без учета (а) и с учётом вибрации инструмента (б) в момент времени $t=100 \cdot T/N$

На Рис. 18 представлены текстуры обработанной поверхности без учета и с учётом вибрации инструмента. Приведены следующие параметры для оценки волнистости поверхности: $Mean$ – среднее значение координаты (Z) поверхности, которое определяет среднюю линию профиля; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, которое определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля z в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (14)$$

где $z(x)$ – отклонение профиля, представляющее собой расстояние между любой точкой профиля и средней линией.

S – средний шаг неровностей профиля по вершинам (между вершинами характерных неровностей) в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (15)$$

где S_i – шаг неровностей соседних вершин; n – число шагов в пределах l .

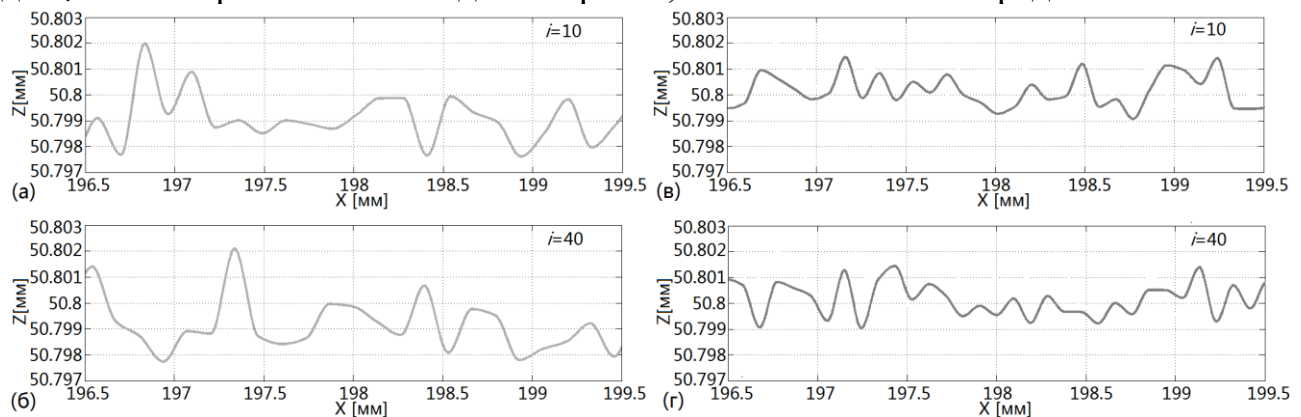


Рис. 19. Изменения геометрии обработанной поверхности заготовки после прохождения зерен без учета (а, б) и с учётом (в, г) вибрации круга

На Рис. 19 представлены увеличенные изображения обработанной поверхности при моделировании без учёта и с учётом вибрации круга. При сравнении параметров волнистости поверхности полученных без учета вибрации и с учётом вибрации видно что, среднее значение $Mean$ увеличивается ($\overline{Mean}_{\delta.s} = 50,7989$ мм, $\overline{Mean}_{c.s} = 50,8006$ мм). Это объясняется наличием упругого отжатия в системе с учетом податливости крепления инструмента. R_a уменьшается ($\overline{R}_{a\delta.s} = 0,6437$ мкм, $\overline{R}_{a c.s} = 0,5264$ мкм), что подтверждает влияние жесткости инструмента на волнистость обработанной поверхности. S также уменьшается ($\overline{S}_{\delta.s} = 0,4115$ мм, $\overline{S}_{c.s} = 0,3421$ мм), однако, на поверхности, полученной с учетом динамики количество пиков на интервале становится больше.

При обработке маложестких деталей типа пластины, соотношение между жесткостями крепления детали может составлять значение $K_x/K_z \approx 3 \div 4$. На Рис. 20 представлены результаты моделирования с учетом податливости детали, соответствующие схеме (Рис. 14) при значениях $K_x/K_z=4$.

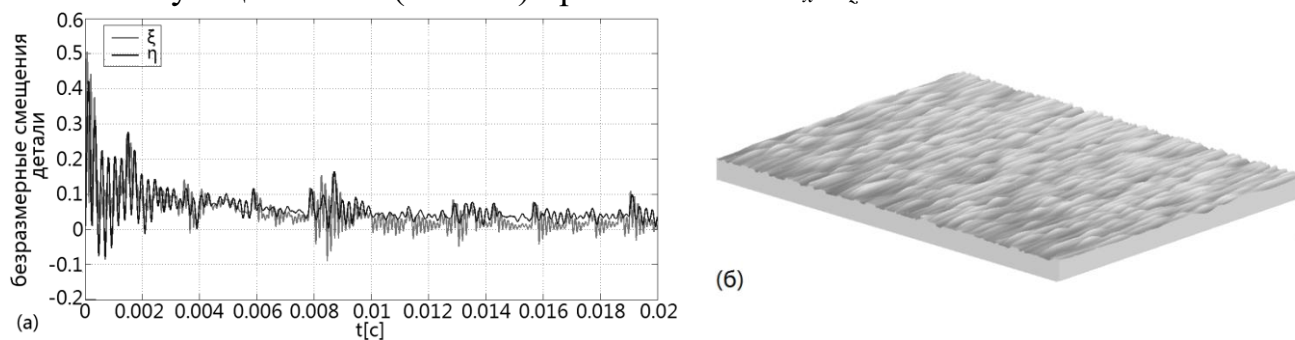


Рис. 20. Изменение безразмерных смещений детали ξ , η при $K_x = 60$ кН/мм, $K_z = 15$ кН/мм (а) и вид детали пластины после обработки (б)

На Рис. 20, а показано изменение безразмерных смещений детали ξ , η при $K_x = 60$ кН/мм, $K_z = 15$ кН/мм, а форма обработанной поверхности детали пластины после прохождения инструмента, на Рис. 20, б. Среднее арифметическое отклонение профиля (волнистость поверхности) $R_a = 0,5673$ мкм.

Основные результаты и выводы

1. Разработана математическая модель микро-резания отдельным абразивным зерном конической и пирамидальной формы с использованием термомеханической модели поведения материала Джонсона-Кука, позволяющая определять НДС в зоне резания, температуру и остаточные напряжения после прохождения зерна, а также исследовать зависимости составляющих сил резания, действующих на зерно, от параметров системы.
2. На основе проведенных КЭ расчетов микро-резания установлена зависимость сил резания от площади или глубины врезания режущей части зерна, которая использована для исследования динамики процесса шлифования.
3. Разработана новая стохастическая модель динамики процесса шлифования с учетом деформируемости технологической системы, позволяющая исследовать динамику процесса плоского шлифования с учетом механизма запаздывания при резании от зерна к зерну, при заданных случайным образом геометрических

параметрах абразивных зерен.

4. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение численного решения уравнений динамики модели, включающие уравнения образования поверхности, с учетом переменного запаздывания.
5. Разработана методика позволяющая оценивать интегральные характеристики качества по результатам моделирования динамики процесса шлифования с учетом вибраций инструмента или детали.
6. В результате моделирования установлено, что для систем с малой жесткостью существуют режимы шлифования, при которых возбуждаются вибрации за счет механизма регенеративного возбуждения колебаний.
7. Результаты моделирования сил резания хорошо соотносятся с данными экспериментальных исследований, измеренных при тестовых режимах обработки шлифованием на образцах.

Список публикации по теме диссертации

1. Воронов С.А., Киселёв И.А., Ма В., Ширшов А.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 5. С. 40-57. (1,13п.л. / 0,25п.л.)
2. Воронов С.А., Ма Вэйдун. Влияние геометрии абразивного зерна на силы резания при шлифовании // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 5. С. 52-63. (0,75п.л. / 0,37п.л.)
3. Воронов С.А., Ма Вэйдун. Влияние геометрических параметров абразивных зерен на силы резания // Вестник машиностроения. 2017. № 9. С. 82-87. (0,375п.л. / 0,19п.л.)
4. Воронов С.А., Ма Вэйдун. Математическое моделирование процесса плоского шлифования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 4. С. 85-94. (0,625п.л. / 0,31п.л.)
5. Воронов С.А., Ма Вэйдун, Воронова И.С. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. Кинематика плоского шлифования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 11. С. 68-78. (0,625п.л. / 0,2п.л.)
6. Воронов С.А., Ма Вэйдун. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. Динамика плоского шлифования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1. С. 26-36. (0,688п.л. / 0,34п.л.)
7. Voronov S.A., Weidong Ma. Simulation of chip-formation by a single grain of pyramid shape // Vibroengineering Procedia. 2016. V. 8. P. 39-44. (0,375п.л. / 0,19п.л.)
8. Voronov S.A., Veidun Ma. Mathematical Modeling of the Cylindrical Grinding Process // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. V. 46(4). P. 394-403. (0,625п.л. / 0,31п.л.)