

**Проектування сучасних технологічних систем і комплексів
механічного оброблення матеріалів та складання вузлів**

УДК 621.923

В.В. ГУСЕВ (д-р техн. наук, проф. gusev@mech.dgtu.donetsk.ua),**Л.П. КАЛАФАТОВА** (д-р техн. наук, проф. lpk04nov@mail.ru)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

С.Ю. ОЛЕЙНИК (асп., svetaoleynik@mail.ru)

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
ОБОЛОЧЕК ИЗ СИТАЛЛА ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

Разработана математическая модель технологической системы при шлифовании деталей типа оболочек из ситалла. Предложена методика расчета и анализа ее динамических характеристик, которая позволяет определить направления совершенствования элементов технологической системы с целью снижения трудоемкости изготовления качественных изделий.

алмазное шлифование, оболочки из ситалла, математическая модель, технологическая система, динамические характеристики, методика расчета

Введение

Условия эксплуатации рассматриваемых деталей, тонкостенных оболочек вращения сложной пространственной формы из ситалла, предполагают повышенные требования к точности изготовления и прочностным характеристикам, которые для керамических материалов (в данном случае ситаллов) в значительной степени определяются шероховатостью обработанной поверхности и сведению к минимуму дефектности поверхностного слоя. Для получения требуемого качества поверхности детали заготовку последовательно подвергают: черновому, получистому и чистовому шлифованию, полированию и алмазной доводке. После механической обработки поверхность деталей содержит дефектный слой, наличие которого снижает эксплуатационные характеристики изделий. Поэтому дополнительно деталь подвергается комбинированному упрочнению, в результате которого, путем химического травления удаляется поверхностный слой детали, содержащий дефекты. Последним этапом обработки осуществляется ионное упрочнение поверхности. Глубина дефектности поверхностного слоя, оставшегося после механической обработки, определяет продолжительность операций химического травления и упрочнения, а, следовательно, и себестоимость изделия.

Вопросам повышения эффективности механической обработки изделий из ситаллов посвящено значительное число работ, в которых рассмотрено влияние различных факторов на качество обработанной поверхности [1-3]. Основные направления исследований: изучение механизмов образования поверхностного слоя при абразивной обработке; разработка рациональных схем шлифования; изучение влияния характеристик инструментов и способов их правки на дефектность шлифуемой поверхности; изучение влияния режимов шлифования и физико-механических свойств обрабатываемого материала на величину составляющих силы резания и, как следствие, на качество обработки с учетом диспергирующей способности используемых СОТС; разработка подхода к определению рациональных межоперационных припусков на обработку. В работах [4, 5] экспериментальным путем доказывается, что одним из факторов, влияю-

щим на развитие дефектного слоя во время механической обработки, являются вибрации в технологической системе СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь). Кроме того, что вибрации повышают дефектность поверхностного слоя, они также вызывают недопустимую волнистость обработанной поверхности, а также снижают общую эффективность обработки рассматриваемых деталей. Способы снижения вибраций в технологической системе механической обработки освещаются в большом количестве источников. Однако решение этой задачи остается актуальным при создании технологий обработки тонкостенных оболочек вращения сложной пространственной формы из ситаллов. Вибрации, возникающие в технологических системах при механической обработке, в частности, при шлифовании, можно разделить на вынужденные, автоколебания, параметрические и смешанные. Установление природы колебательного процесса, причин его вызывающих, является основным для разработки модели колебательной системы и определяет способы снижения её виброактивности.

Цель данной работы: разработка эквивалентной динамической модели технологической системы, состоящей из детали (оболочки вращения сложной формы из ситалла), приспособления (оправки), шпинделя станка и шлифовального круга, для определения динамических характеристик элементов системы при шлифовании, что позволит обосновать технологические решения, обеспечивающие повышение качества обработки изделия за счет повышения виброустойчивости системы.

Основное содержание работы

Эквивалентная модель в данном случае должна соответствовать рассматриваемой технологической системе в заданном частотном диапазоне по жесткости, значениям низших собственных частот, лежащих в заданном диапазоне, и соответствующих им формам колебаний, таким образом, чтобы ее смоделированные движения в определенной мере характеризовали движения реальной упругой системы. Упругая система станка – это сложная колебательная система с распределенными инерционными и упругими параметрами, имеющая бесконечное число степеней свободы и бесконечное множество частот собственных колебаний. Так как точный расчет такой системы невозможен, то при расчете динамических характеристик реальную упругую систему станка заменяют расчетной схемой – системой с конечным числом степеней свободы в виде некоторого количества сосредоточенных масс, соединенных невесомыми упругими и диссипативными элементами, обычно, с литейными характеристиками [6, 7].

Технологическую систему круглого продольного наружного шлифования схематически можно представить в виде динамической схемы, представленной на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: m_1, k_1, c_1 – соответственно приведенная масса, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования шлифовального круга; m_2, k_2, c_2 – соответственно приведенная масса, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования обрабатываемой детали; m_3, k_3, c_3 – соответственно приведенная масса, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования приспособления; m_4, k_4, c_4 – соответственно приведенная масса, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования, шпинделя станка. P_T, P_N – тангенциальная и нормальная составляющие силы резания; $v_{кр}, v_d$ – линейные скорости круга и детали, соответственно.

При шлифовании хрупких неметаллических материалов из двух названных составляющих силы резания большее влияние на формирование уровня дефектности оказывает сила P_N , направленная непосредственно в обрабатываемую поверхность. При этом шлифование изделий рассматриваемого класса из-за сложности их формы сопро-

вождеается возникновением переменной по величине силы P_N , значение которой будет зависеть от места контакта круга с заготовкой, то есть, будет переменной во времени.

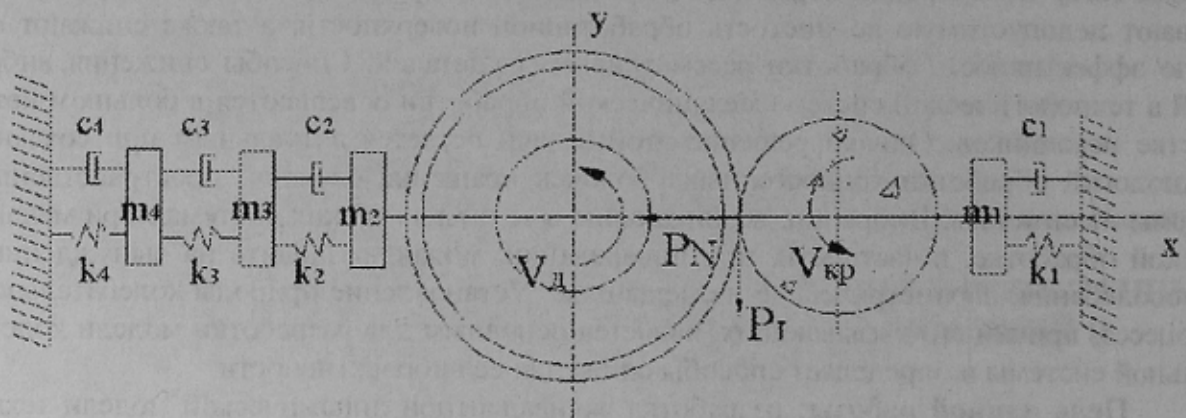


Рис. 1. Расчетная схема технологической системы круглого продольного наружного шлифования

Поэтому на рис. 2 в расчетную схему динамической системы шлифования включены: возмущающая сила Q , соответствующая переменной во времени нормальной составляющей силы резания P_N ; $k_{кон}$ – коэффициент жесткости контакта между шлифовальным кругом и деталью во время обработки; $c_{кон}$ – коэффициент демпфирования в контакте между шлифовальным кругом и деталью во время обработки.

Решение для такого рода динамических схем можно получить, используя второй закон Ньютона [6, 7], и в соответствии с принципом Даламбера. В результате уравнения движения для масс m_1, m_2, m_3, m_4 в матричной форме можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_1 + c_{кон} & -c_{кон} & 0 & 0 \\ -c_{кон} & c_{кон} + c_2 & -c_2 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3 - c_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_1 + k_{кон} & -k_{кон} & 0 & 0 \\ -k_{кон} & k_{кон} + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 - k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ Q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Коэффициенты m, c, k , характеризующие, соответственно, приведенные массы, демпфирование, жесткость, определяются по методике, приведенной в работе [6].

Расчет рассматриваемой технологической системы при использовании такого метода осложняется необходимостью определения коэффициентов уравнений динамики, которые на разных участках обрабатываемой детали изменяются, причем нелинейно, что связано со способом установки, закрепления детали и жесткостью приспособления, а также непосредственно с самой сложной формой обрабатываемой детали – тонкостенной оболочки. Поэтому для расчета динамических характеристик технологической системы использовался метод конечных элементов, реализованный в конечно-элементном пакете SOLIDWORKS SIMULATION, интегрированном в SOLIDWORKS 2009.

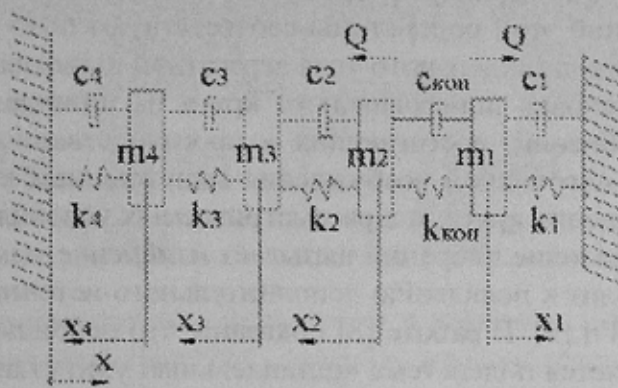


Рис. 2. Расчетная схема динамической системы наружного шлифования

Технологическая система СПИД для наружного шлифования изделия - оболочки сложной пространственной формы, условно, для упрощения, была разделена на две подсистемы: «шпиндельный узел станка – приспособление – заготовка» и «шлифовальный круг – шпиндель агрегатной головки – суппорт».

На данном этапе исследований их объектом является подсистема, состоящая из обрабатываемой детали и приспособления - оправки, представляющей собой консоль с большим вылетом, которая закрепляется в патроне токарного станка. Рассматриваемая подсистема через зону резания контактирует со второй подсистемой, состоящей из шлифовального круга, шпинделя агрегатной головки и суппорта. В контактной зоне оправки и обрабатываемой детали установлены втулки из гетинакса. Схема технологической системы наружного шлифования оболочки из ситалла представлена на рис. 3.

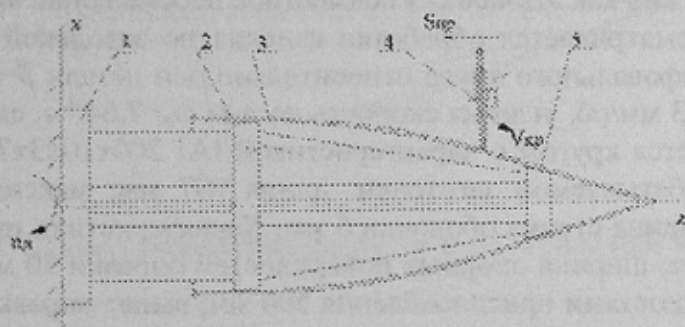


Рис. 3. Схема технологической системы при наружном шлифовании детали
1 – оправка; 2, 5 - втулки из гетинакса; 3 - обрабатываемая деталь; 4 – шлифовальный круг IAI 200x10x3x76 AI – 315:250-4- M2 - 01

В работе [8] моделировалось состояние подсистемы «шпиндель станка - приспособление - заготовка» в процессе обработки. Результаты показали, что она является источником возникновения вибраций, которые вносят значительный вклад в формирование требуемых характеристик детали.

Так в работе [8] отмечается, что в подсистеме «двигатель - коробка скоростей - деталь» не возникают крутильные колебания. При расчете изгибных колебаний в упругой подсистеме «шпиндельный узел станка – приспособление – заготовка» было установлено, что нижняя частота собственных изгибных колебаний подсистемы равняется 50 Гц. Амплитуду колебаний и их частоту, возникающую при шлифовании, определяли

по гипсовым слепкам с поверхности заготовки. Экспериментальные значения собственных частот колебаний этой подсистемы соответствуют 60 ± 5 Гц и 123 ± 10 Гц. Нижняя собственная частота шпиндельного узла агрегатной шлифовальной головки составляет 710 Гц. При установке шлифовального круга на шпиндель агрегатной головки возможно появление биений, достигающих в производственных условиях величины 0,06 мм, что является источником возбуждения вынужденных колебаний с частотами, кратными частоте вращения круга, и в рассматриваемых условиях соответствует частотам, кратным 48 Гц. Наличие вибраций вызывает изменение макропрофиля круга, что, в свою очередь, приводит к появлению дополнительного источника возбуждения колебаний с частотой 144 Гц [9]. В работе [8] показано, что основным источником возникновения вибраций является подсистема «шпиндельный узел станка – приспособление – заготовка». Это связано, прежде всего, с переменными нагрузками, действующими со стороны шлифовального круга агрегатной головки на указанную подсистему и, прежде всего, на заготовку.

Для исследования динамического поведения подсистемы достаточно проведение линейного динамического анализа, так как все материалы элементов подсистемы подчиняются закону Гука. Вызванное смещение оболочки – детали под действием нагрузки при шлифовании достаточно мало (изгиб стенки оболочки не превышает величины припуска на толщину заготовки [10]), что позволяет игнорировать изменения в коэффициентах жесткости материалов. Граничные условия (условия закрепления, место приложения нагрузки, геометрия элементов технологической подсистемы) не изменяются во время приложения нагрузок, вызванных шлифованием. Таким образом, можно считать, что составляющие силы резания постоянны по амплитуде, направлению и распределению, и не изменяются в конкретном месте приложения на заготовке. Из-за отсутствия больших деформаций нелинейность, вызванная контактом между двумя любыми элементами, входящими в подсистему, не учитывается. Поэтому контактное граничное условие выбрано как «Bonded» – совместное перемещение элементов модели.

В работе рассматривается обработка изделия по заводской схеме шлифования (угол разворота шлифовального круга относительно оси детали $\beta = 6^\circ$, глубина резания $t = 1$ мм, подача $s = 0,73$ мм/об, угловая скорость детали $\omega_d = 7,64^{-1}$ с, скорость круга $v_{кр} = 40$ м/с). Обработка ведется кругом с характеристикой IAI 200x10x3x76 AI-315/250-4-M2-0I. Параметры обрабатываемой заготовки: длина 907 мм; максимальный наружный диаметр 450 мм; толщина стенки оболочки 6 мм. Характеристики приспособления – оправки: диаметр 80 мм; ширина опорных поверхностей оправки 50 мм; расстояние между опорными поверхностями приспособления 500 мм; вылет оправки от торца шпинделя станка 200 мм; толщина ребер жесткости приспособления 10 мм.

Возможности пакета SOLIDWORKS SIMULATION позволяют моделировать вынужденные колебания рассматриваемой подсистемы. При этом не учитывается вращение детали и оправки, а источник возбуждения, вызванный биением шлифовального круга, заменяется периодической силой шлифования.

Физико-механические свойства материалов элементов рассматриваемой подсистемы представлены в табл. 1.

Адекватность создаваемой модели во многом зависит от выбора граничных условий. При моделировании принято, что заготовка при закреплении закреплена жестко. На рис. 4 приведены точки, в которых при моделировании прикладывалась переменная нагрузка, обусловленная процессом шлифования. На рис. 4 нулевая точка соответствует месту контакта заготовки с цилиндрической опорой приспособления, то есть, наиболее приближена к торцу шпинделя станка.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості матеріалів елементів підсистеми

Параметр	Заготовка – ситала АС-418	Приспособление	
		Оправка – сталь 45	Гетинаксовыє втулки
Модуль упругості, Н/м ²	8.5e+010	2.05e+011	1.5e+009
Коефіцієнт Пуассона	0.25	0.29	0.22
Плотність, кг/м ³	2500	7850	1350

В дослідженні учитувались нормальна і тангенціальна складові сили різання. Нормальна складові сили різання, змінюючися по мірі переміщення інструмента вздовж осі заготовки, визначалась по експериментальному графіку [9], приведеному на рис. 5.

Тангенціальна складові сили різання визначалась із співвідношення $F_T = 0,2 \cdot P_N$. В більшості реальних систем продольного шліфування домінуючими являються поперечні коливання в площині $Y\theta Z$, тому як жорсткість системи вздовж осі Z значительно (на порядок більше) превосходить її жорсткість вздовж осей Y і Z . (Показати в одній точці приложення сил різання)!!!! Крім того, відомо, що при шліфуванні осева складові сили різання P_o значительно менше других складові. В зв'язі з цим при розрахунках складові сили P_o будемо пренебрегати.

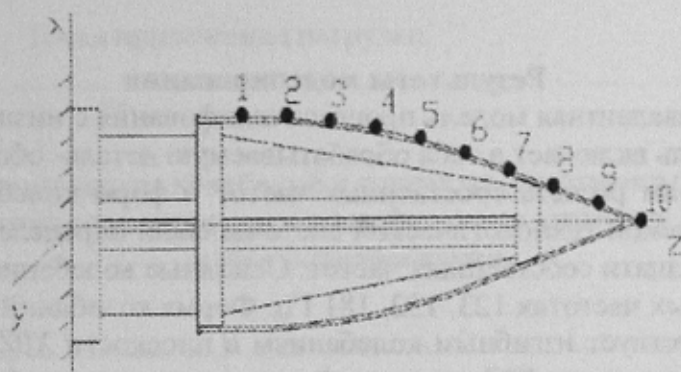


Рис. 4. Схема приложення навантаження к заготовке при моделюванні

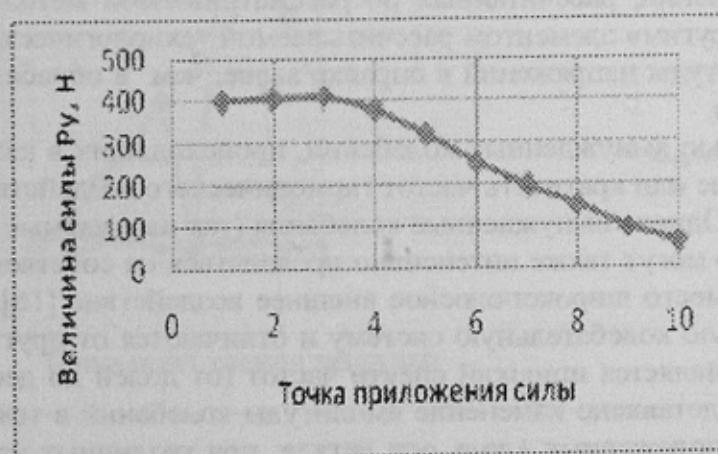


Рис. 5. Зміна складові сили різання P_N вздовж контура деталі (експериментальні дані [9])

Колебание силы резания относительно средней величины зависит от уровня вибраций в технологической системе (какова величина переменной составляющей силы!!!). Для исследований принималась частота возбуждающей силы 144 Гц с учетом того, что биение круга в производственных условиях максимально достигает 0,06 мм [8, 9]. Кроме того, были проведены расчеты для частот колебаний близких к величине 144 Гц и находящихся в диапазоне от 119 Гц до 182 Гц.

Для расчета вынужденных колебаний необходимо указать коэффициент демпфирования расчетной системы. Этот коэффициент зависит от коэффициента внутреннего трения в материале оправки как элемента колеблющейся системы, «упруго» деформируемого при вибрациях, и от коэффициента внешнего трения между инструментом и изделием (в данном расчете незначителен и не учитывается). Некоторое дополнительное демпфирующее воздействие на систему могут оказывать стыки (контакты) между заготовкой и оправкой и оправкой и патроном. Однако в рассматриваемых случаях эти стыки неподвижны и прочно затянуты, их демпфирующим воздействием можно пренебречь [11]. Декремент колебаний может изменяться в зависимости от амплитуды, частоты колебаний и от размеров образца – оправки с изделием, и эта зависимость тем заметнее, чем больше демпфирование в материале оправки [12]. Рассеяние энергии в материале существенно зависит от размеров и формы образца - оправки [13]. В настоящем расчете учитываются: демпфирование материала оправки соответствующим коэффициентом 0,004 [14], а также коэффициент модального демпфирования системы, равный 0,01 [15].

Результаты моделирования

Создана эквивалентная модель процесса шлифования с низшей собственной частотой 123 Гц. Модель включает в себя обрабатываемую деталь- оболочку и оправку.

По результатам расчета собственных частот и форм колебаний эквивалентной модели рассматриваемой технологической системы были определены величины и формы ее первых пятнадцати собственных частот. Основные колебания происходят на первых трех собственных частотах 123, 132, 181 Гц. Форма колебаний на первой собственной частоте соответствует изгибным колебаниям в плоскости XOZ , на второй – изгибным колебаниям в плоскости YOZ , на третьей – крутильным колебаниям вокруг оси OZ . Расчет показал, что вибрации непосредственно оболочки происходят на высоких частотах (1200 – 1500 Гц и более) и незначительны по амплитуде. Кроме того, диаграмма амплитуды напряжений, рассчитанных по рассматриваемой методике, подтверждает, что основным «упругим» элементом рассчитываемой технологической системы является оправка. Амплитуды напряжений в оправке выше, чем в обрабатываемой оболочке примерно в 100 раз.

Особенностью вынужденных колебаний, происходящих в каких-либо системах, является совпадение или кратность частот гармонического воздействия и вынужденной реакции системы. Однако вынужденные колебания (так называемые случайные вынужденные колебания) могут также интенсивно проявляться на собственных частотах системы, если имеет место широкополосное внешнее воздействие [16]. Станки представляют собой сложную колебательную систему и отличаются от других машин тем, что при их работе проявляется широкий спектр частот (от долей до десятков тысяч герц) [17]. На рис. 6 представлено изменение амплитуды колебаний в технологической системе в точках, расположенных вдоль оси детали, при различных частотах гармонического воздействия на заготовку в рамках построенной модели. Кривые построены по результатам линейного частотного анализа.

На рис. 7 представлено изменение амплитуды колебаний в технологической системе в точках, расположенных вдоль оси детали, при полном совпадении частот периодической силы с собственными частотами рассматриваемой модели технологической системы (явление резонанса).

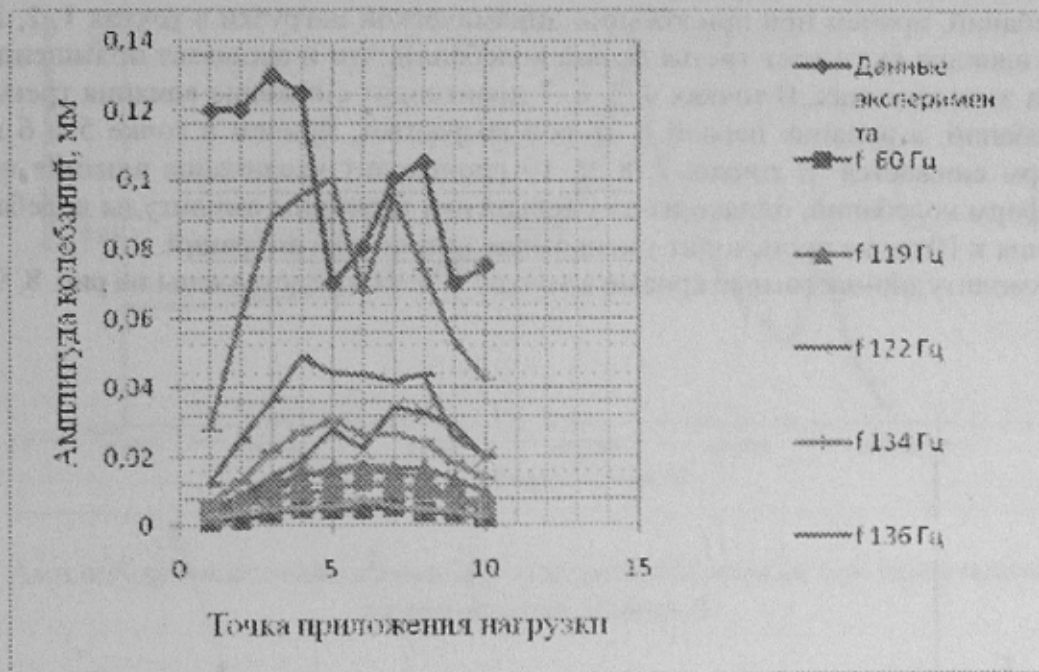


Рис. 6. Изменение амплитуды колебаний в точках, расположенных вдоль оси детали, при различных частотах гармонического воздействия на заготовку в реальных условиях и при моделировании

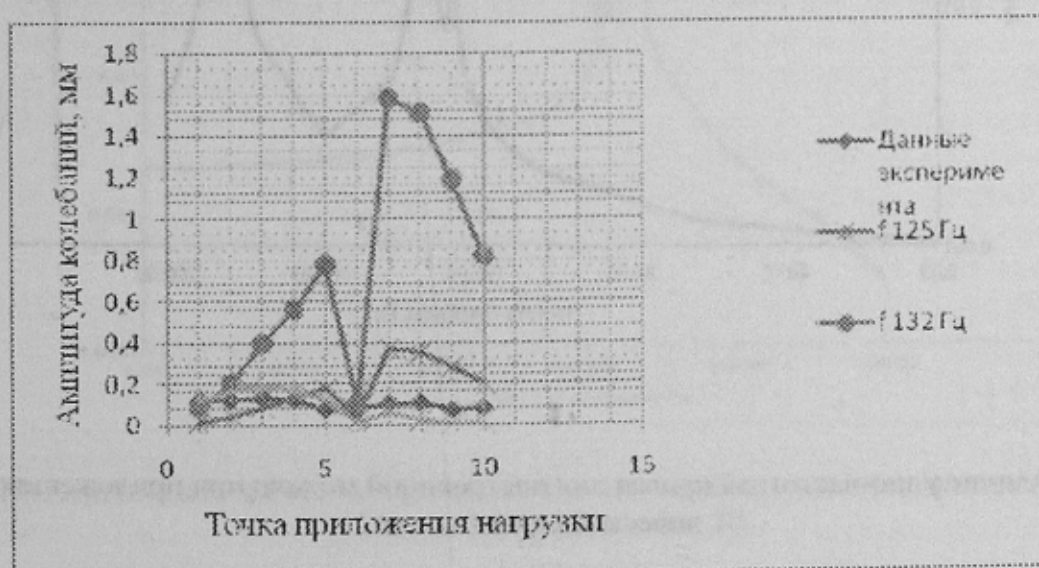


Рис. 7. Изменение амплитуды колебаний в точках, расположенных вдоль оси детали, при воздействии на технологическую систему силы с частотой, совпадающей с собственной частотой системы

Формы полученных расчетных кривых близки к форме кривой, построенной по экспериментальным данным (отличаются по величине амплитуды), и при широкополосном внешнем воздействии могут комбинироваться в кривую, близкую к экспериментальной.

Частотный анализ подтвердил, что доминирующими являются первые три формы колебаний, причем при приложении динамической нагрузки в точках 1, 2, 3 значительное влияние оказывает третья форма колебаний, что и вызывает повышенные вибрации на этих участках. В точках 4, 5, 6, 7 происходит снижение влияния третьей формы колебаний, а влияние первой и второй возрастает, причем в точке 5 и 6 влияние всех форм снижается. В точках 7, 8, 9, 10 происходит увеличение влияния первой и второй форм колебаний, однако из-за уменьшения величины амплитуды колебаний силы резания к 10 точке происходит уменьшение амплитуды вибраций.

Амплитудно-частотные кривые в точках 1, 6, 10 представлены на рис. 8, 9, 10.

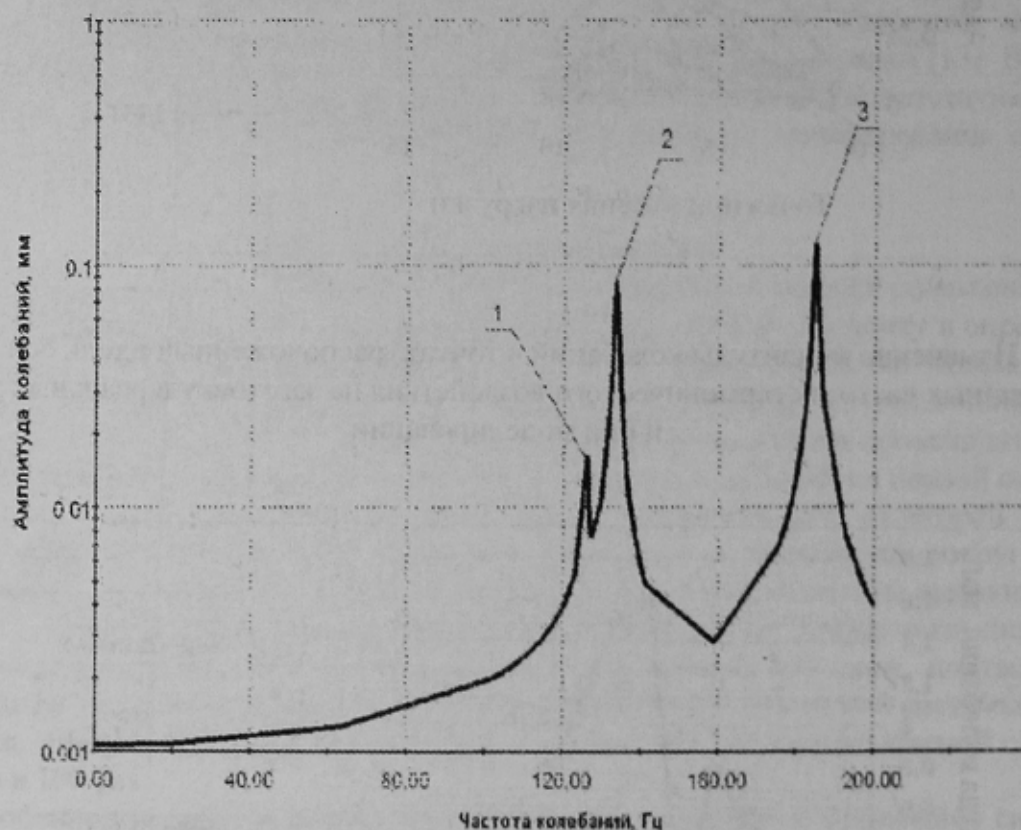


Рис. 8. Амплитудно-частотная кривая для построенной модели при приложении периодической силы в точке 1

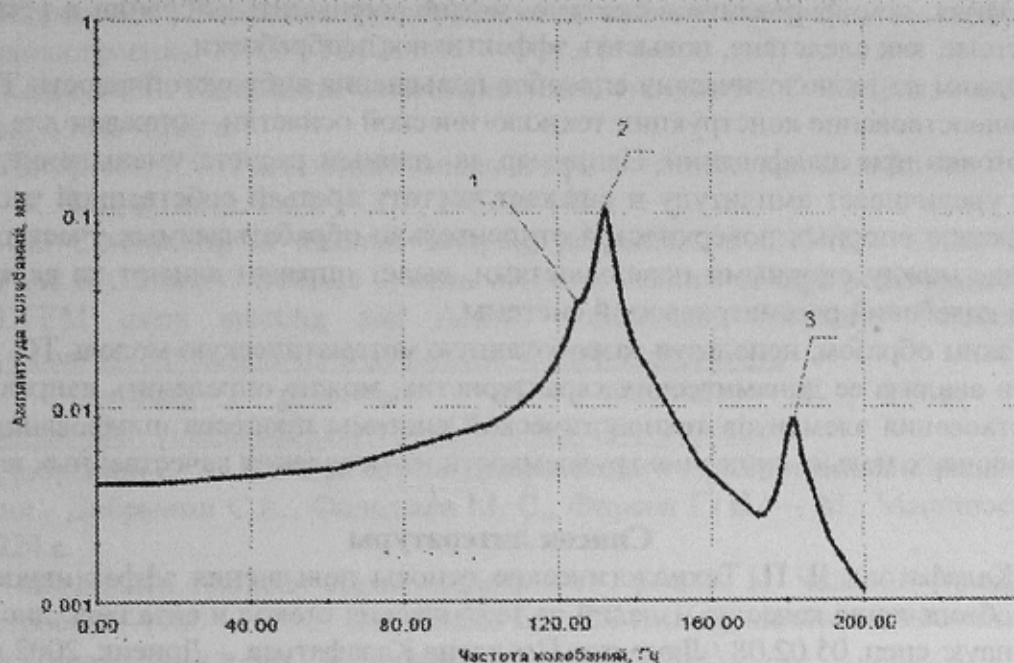


Рис. 9. Амплитудно-частотная кривая для построенной модели при приложении периодической силы в точке 6

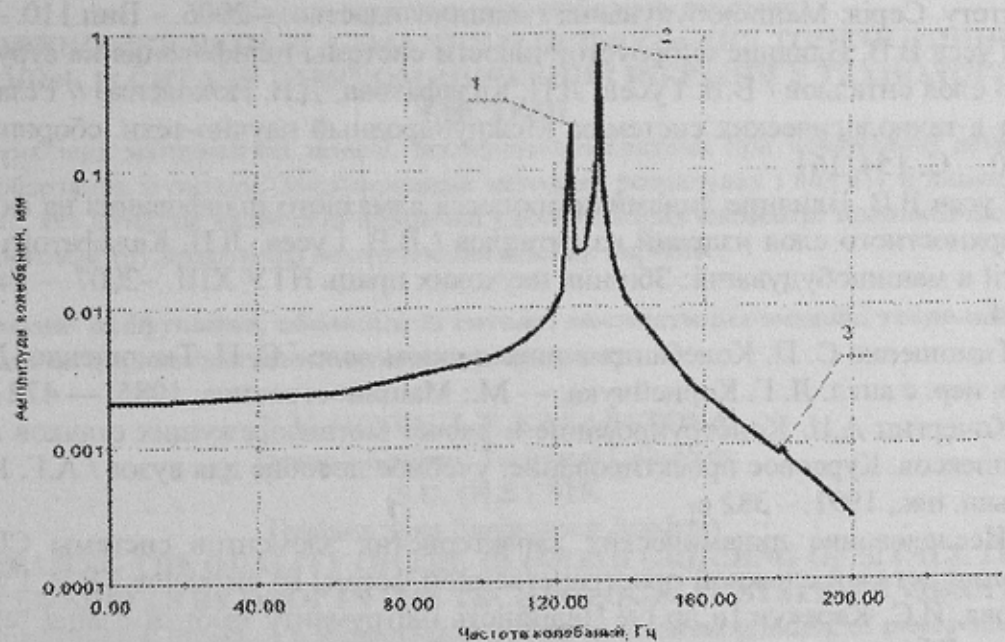


Рис. 10. Амплитудно-частотная кривая для построенной модели при приложении периодической силы в точке 10

Выводы

Частота и амплитуда периодической (гармонической) силы, в нашем случае – силы резания, определяет амплитуду колебаний заготовки, поэтому, изменяя значения

силы резания, демпфирование в системе, можно уменьшить вибрации в технологической системе, как следствие, повысить эффективность обработки.

Одним из технологических способов повышения виброустойчивости ТС является совершенствование конструкции технологической оснастки – оправки для базирования заготовки при шлифовании. Например, по данным расчета уменьшение диаметра оправки увеличивает амплитуду и снижает частоту третьей собственной частоты ТС. Расположение опорных поверхностей относительно обрабатываемых участков детали, расстояние между опорными поверхностями, вылет оправки влияют на величину амплитуды колебаний рассматриваемой системы.

Таким образом, используя разработанную математическую модель ТС, методику расчета и анализа ее динамических характеристик, можно определить направления совершенствования элементов технологической системы процесса шлифования деталей типа оболочек с целью снижения трудоемкости изготовления качественных изделий.

Список литературы

1. Калафатова Л. П. Технологические основы повышения эффективности обработки и обеспечения качества изделий из технических стекол и ситаллов: дис... доктора техн. наук: спец. 05.02.08 / Людмила Павловна Калафатова. – Донецк, 2002. – 441 с.
2. Гусев В.В. Вплив стану робочої поверхні алмазного інструмента на процес шліфування крихких неметалевих матеріалів / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова // Вісник Житомирського державного технічного університету. – 2003. – №2 (26). – С.49 – 54.
3. Гусев В.В. Назначение режимов резания при алмазном шлифовании конструкционной керамики / В. В. Гусев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2006. – Вип.110. – С.6–15.
4. Гусев В.В. Влияние виброустойчивости системы шлифования на структуру дефектного слоя ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – 2006. – Вып. 70. – С. 154–161.
5. Гусев В.В. Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ ХПІ. –2007. – Вип. 2 (15). – С.79–84.
6. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука. — М.: Машиностроение, 1985. — 472 с.
7. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: учебное пособие для вузов / А.Г. Кочергин. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 382 с.
8. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, И.С. Каракуц [и др.] // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. — 2007. – Вип. 21. – С. 148 – 155.
9. Гусев В.В. Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ ХПІ. – 2007. – Вип. 2 (15). – С.79–84.
10. Алямовский А.А. Инженерный анализ в среде SOLIDWORKS SIMULATION, новое в версии 2009. - 2008.12-December_21.pdf [Электронный ресурс] / А.А. Алямовский. – Режим доступа: www.solidworks.ru/downloads.

11. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
12. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
13. Писаренко Г.С. Рассеивание энергии при механических колебаниях / Г.С. Писаренко. – К.: Изд-во акад. наук УССР, 1962. – 145 с.
14. Cai C. Modeling of material damping properties in ANSYS / C. Cai, H. Zheng, M.S. Khan and K.C. Hung // Defense systems division, institute of high performance computing: CADFEM users meeting and ANSYS conference, Germany, October, 2002: www.ansys.com/industries/automotive/material-damping-properties
15. Damping properties of materials / Tom Irvine: www.cs.wright.edu/~tjirvine/damping%20properties%20of%20materials.
16. Добрынин С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: справочник / Добрынин С.А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
17. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. В. Н. Челомей (пред). — М.: Машиностроение, 1980 — Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. — 1980. — 544 с.

В.В. ГУСЕВ, Л.П. КАЛАФАТОВА

Донецкий национальный технический университет

С.Ю. ОЛІЙНИК:

Донбаська державна машинобудівна академія

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ
ОБОЛОНОК ІЗ СИТАЛУ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ
СИСТЕМІ**

Розроблена математична модель технологічної системи при шліфуванні деталей типу оболонок обертання із ситалу. Запропонована методика розрахунку і аналізу її динамічних характеристик, яка дозволяє визначити напрямки удосконалення елементів технологічної системи з метою зниження трудомісткості виготовлення якісних виробів.

алмазне шліфування, оболонки із ситалу, математична модель, технологічна система, динамічні характеристики, методика розрахунку

V.V. GUSEV, L.P. KALAFATOVA

Donetsk National Technical University

S.U. OLEYNIK

Donbass State Engineering Academy

**INCREASING THE QUALITY OF THE DIAMOND GRINDING OF SITALL THIN-
WALLED SHELLS BY DROP IN THE TECHNOLOGICAL SYSTEM'S VIBRATION**

A mathematical model of a technological system in diamond grinding of pieces such as sitall thin-walled shells was developed. The method of calculation and analysis of the technological system's dynamics characteristics was proposed. The method allows to determining the direction of improving the system's elements. It will reduce the complexity of manufacturing of quality products.

diamond grinding, the shell of pyroceramic, mathematical model, technological system, dynamics characteristics, method of calculation