

УДК 621.923

Калафатова Л. П.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПРАВКИ НА ВИБРАЦИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА АЛМАЗНОГО КРУГА И ИЗДЕЛИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Крупногабаритные тонкостенные оболочки вращения из хрупких неметаллических материалов (ХНМ) применяются в авиационной и ракетной отрасли промышленности. Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к таким деталям, это обеспечение заданных геометрических характеристик изделия тонкостенной сложнопрофильной высокоточной оболочки вращения из ХНМ, за счет чего обеспечиваются аэродинамические и радиотехнические свойства деталей при сохранении их высокой прочности даже при высоких температурах. Заданная высокая точность профиля изделия обеспечивается на операциях механической обработки, которые включают черновые и чистовые операции шлифования внутреннего и наружного контуров, на которых удаляется основной припуск (до 8–9 мм на сторону). При этом алмазно-абразивная обработка ведется способом глубинного шлифования (глубина резания 0,5–1,5 мм), которое сопровождается хрупким разрушением обрабатываемого материала и формированием нарушенного обработкой дефектного слоя. Алмазное шлифование тонкостенных оболочек вращения происходит в условиях динамической неустойчивости процесса, которая обусловлена неравномерной жесткостью подсистемы «шпиндель – оправка – заготовка» по длине оболочки; неравномерностью сил резания в процессе шлифования при перемещении круга по формируемой поверхности изделия; быстрым износом шлифовальных кругов; биением и огранкой алмазного инструмента [1, 2]. В результате формируется профиль изделия, который характеризуется волнистостью с переменными шагом и высотой для различных участков заготовки вдоль её оси. Окончательная механическая обработка поверхности осуществляется доводкой алмазными брусками, которая в виду сложности профиля изделия производится вручную, что увеличивает трудоемкость получения готовой детали.

Поэтому важной технологической задачей является повышение качества поверхности детали после алмазно-абразивной обработки.

Для обеспечения заданных прочностных свойств после механической обработки в зависимости от наличия, глубины и структуры нарушенного обработкой поверхностного слоя изделия проводится операция химического травления, на которой полностью удаляется нарушенный обработкой слой, с последующим ионным упрочнением сформированной поверхности.

Спектр колебаний технологической системы (ТС) во время алмазного шлифования обусловлен сложным комплексом взаимодействия свободных, вынужденных, параметрических и автоколебательных процессов. Спектр собственных частот технологической подсистемы «шпиндель – приспособление – заготовка» также достаточно разнообразен и зависит от конструктивных характеристик подсистемы, включая конструкции приспособления оправки и обрабатываемой заготовки, а также от расположения их друг относительно друга, то есть, от базирования и фиксации заготовки на оправке.

В работах [1, 3] был осуществлен анализ динамического поведения технологической системы алмазного шлифования. По его результатам были разработаны расчетные схемы упругой системы алмазно-абразивной обработки, на основании которых была создана модель динамического поведения ТС с учетом параметрических колебаний заготовки – оболочки [4, 5]. Используя разработанную модель, проведено исследование влияния различных технологических параметров на интенсивность вибраций в зоне контакта инструмента и заготовки.

Вибрации ТС в данном случае рассматриваются как фактор, напрямую влияющий на качество поверхностного слоя, в данном случае его геометрическую характеристику волнистость. В связи с этим расчет динамических характеристик был приведен к зоне контакта шлифовального круга и заготовки как к пространству, в котором происходит формирование геометрии поверхности изделия.

Ранее было установлено, что основными в спектре колебаний являются вибрации вынужденной и параметрической природы возникновения. При этом вынужденные колебания в большей степени зависят от биения и огранки алмазного шлифовального круга; конструкции приспособления-оправки, характеризующейся его жесткостью, и от величины силы резания. Развитие параметрических колебаний полностью зависит от конструктивных особенностей заготовки – тонкостенной оболочки вращения и её установки на оправке, которое характеризуется расположением опор приспособления относительно поверхностей оболочки, а также от режимов обработки, влияющих на уровень силовой нагрузки на поверхность оболочки при резании и скорость перемещения этой нагрузки по поверхности заготовки.

Рассмотрим подробнее характеристики параметрических колебаний [6, 7]. По внешним проявлениям параметрические колебания сходны с вынужденными, но отличаются тем, что поддерживаются за счет изменения параметров самой системы. При определенных соотношениях между частотами возмущающей силы (в данном случае это радиальная составляющая силы резания) и собственными частотами системы малое начальное возмущение приводит к развитию колебаний большой амплитуды. Резонанс, появляющийся при совпадении частот вынужденных колебаний и собственных колебаний системы, проявляется в виде возрастающих колебаний устойчивой системы. Параметрический резонанс представляет собой возрастающие колебания около неустойчивого положения равновесия, то есть он связан с неустойчивостью равновесного состояния системы, при котором любое случайное возмущение приводит к её раскачиванию. Также при параметрическом резонансе амплитуда колебаний возрастает по экспоненциальному закону, а при обычном резонансе – по линейному.

Малая расстройка механической системы (некоторое изменение параметров, например, их ужесточение или повышение сопротивления) не может стабилизировать ее неустойчивость, тогда как при вынужденных колебаниях амплитуда нарастает до бесконечности только в случае точного резонанса. Добавление линейного затухания также не стабилизирует неустойчивость, а лишь расширяет границы зон устойчивости на диаграмме Айнса-Стретта, на которой в координатах  $a$  и  $q$ , являющихся коэффициентами уравнения Матье, изображены области устойчивых и неустойчивых состояний исследуемой системы [7]. Области неустойчивости в пространстве параметров  $a$  и  $q$ , при которых уравнение Матье имеет неограниченное решение, заштрихованы.

Работы, посвященные исследованию параметрических колебаний тонкостенных оболочек при воздействии на них подвижной нагрузки, направлены на исследование устойчивости конструкции оболочек к резонансам параметрического характера. Дифференциальные уравнения, используемые для определения радиального перемещения серединной поверхности рассматриваемого участка оболочки под действием подвижной нормальной локальной нагрузки, приводят к уравнению Матье. Это уравнение детально исследовано математиками и его решения составляют особый класс специальных функций – функции Матье [8]. Попадание коэффициентов уравнения Матье в область неустойчивости говорит о том, что будут наблюдаться низкочастотные колебания с возрастающей амплитудой, величина которой ограничивается нелинейными свойствами системы. В области устойчивости будут наблюдаться колебания с частотой возбуждающей силы.

Применительно ко всему сказанному можно сделать выводы, что линейное повышение жесткости и демпфирования подсистемы «шпиндель – оправка – заготовка» (увеличение количества опор, «увеличение толщины оболочки») не обязательно приведет к повышению устойчивости системы относительно параметрических колебаний оболочки, поэтому в расчетах необходимо учитывать нелинейные эффекты.

Целью работы является исследование возможности сокращения вибраций в зоне контакта алмазного круга и заготовки при изменении расположения опор оправки (без увеличения их количества) относительно устанавливаемой на ней заготовки – сложно-профильной оболочки.

В данной работе на основе разработанной динамической имитационной модели в системе Matlab Simulink [5] проводится оценка амплитуды и частоты колебаний в зоне контакта алмазного круга и заготовки, а также рассчитываются коэффициенты уравнения Матье а и по данным работ [9] для установления устойчивости ТС алмазной обработки тонкостенных оболочек к параметрическим колебаниям.

При наружном шлифовании оболочки (рис. 1) заготовка устанавливается на оправку. Конструкция приспособления, применяемого на операции шлифования рассматриваемых изделий, представляет собой двухопорную оправку 1, на цилиндрической части соединительных поверхностей, которой расположены ребра жесткости. В качестве опорных элементов применяют гетинаксовые втулки.

Повышение точности формирования поверхности изделия за счет изменения конструкции оправки рассматривалось ранее в работе [10], однако в расчетах не учитывалось, что причиной низкочастотных вибраций являются параметрические колебания стенки оболочки, поэтому указанные разработки в основном направлены на снижение статической деформации стенки.

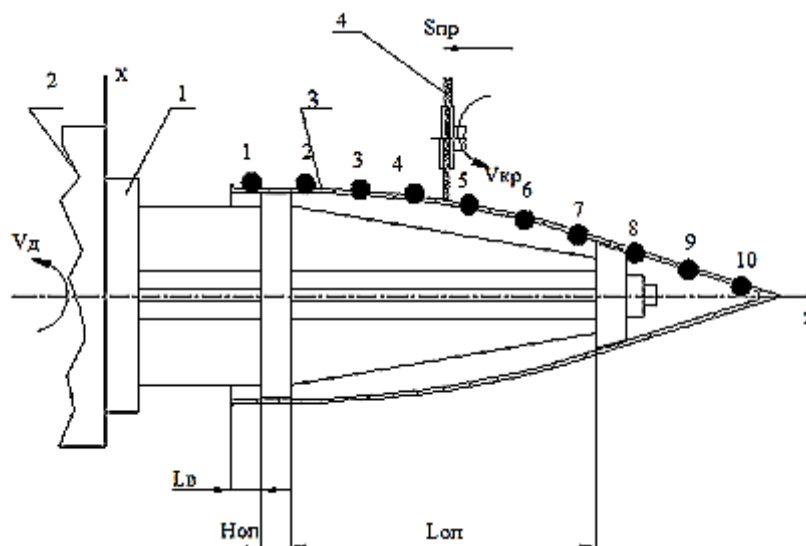


Рис. 1. Схема установки заготовки на операции наружного шлифования изделия:

1 – приспособление-оправка; 2 – шпиндельный узел станка; 3 – формируемый контур изделия; 4 – алмазный круг АІ 200×10×3×76 А 315/250-4М2-01

Геометрические характеристики заготовки: диаметр цилиндрической части 350 мм, общая длина 907 мм, толщина стенки 7 мм, угол полураствора конуса 17°. На рис. 1 точкам обозначены зоны расчета устойчивости и характеристик параметрических колебаний при контакте круга с заготовкой в процессе резания. Расположение оправки относительно поверхности заготовки определим через три параметра: длину вылета заготовки относительно оправки ( $L_B$ ), толщину опор ( $H_{оп}$ ), расстояние между опорами ( $L_{оп}$ ).

Динамическое поведение оболочки зависит от расположения опор оправки по отношению к внутренней поверхности заготовки. Для определения наиболее устойчивой установки оболочки рассмотрим различные варианты расположения опор. Выбор исходных конструкций оправок обусловлен:

- 1) конструкторско-технологическими возможностями установки заготовки на оправку (невозможность установить заготовку по её внутреннему параболическому профилю);
- 2) максимальным числом вариантов возможных расположений опор.

В табл. 1 приведены исходные данные рассматриваемых вариантов конструкции оправок и результаты расчетов собственных частот и форм колебаний. Собственные частоты и формы колебаний ( $\Omega_c$  – низшая собственная частота подсистемы «оправка – заготовка»,  $\Omega_{c0}$  – низшая собственная частота заготовки – оболочки,  $n$  – количество волн по окружности заготовки,  $m$  – количество волн вдоль оси заготовки) получены расчетным путем в программе Solid Works Simulation.

Сравнительные характеристики величины амплитуды колебаний в зоне контакта круга с заготовкой вдоль ее оси представлены: для первых трех вариантов конструкции опор на рис. 2, для 4, 5, 6 вариантов – на рис. 3. Расчеты сделаны для режимов резания: глубина  $t_0 = 1$  мм, подача  $s = 0,5$  мм/об, частота вращения детали  $n = 73$  об/мин, скорость круга  $v_k = 40$  м/с.

Первый вариант (вариант 1), применяемый в производственных условиях, принят за «базовый».

Таблица 1

Исходные данные рассматриваемых вариантов конструкции оправок

№ варианта	$L_B$ , мм	$H_{on}$ мм	$L_{on}$ мм	Расчетные собственные частоты и формы колебаний элементов ТС			
				$\Omega_c$ , Гц	$\Omega_{c0}$ , Гц	$n$	$m$
I Перемещение оправки внутрь заготовки без изменения расстояния между опорами							
1	0	50	500	130	1304	3	1
2	50			140	1356		
3	100			151	1274		
II Перемещение опоры по цилиндрической поверхности с уменьшением расстояния между опорами							
4	50	50	450	125	1428	3	1
5	100		400	120	1565		
III Минимально возможное расстояние между опорами оправки ( $L_{on}$ ) для данной конструкции заготовки-оболочки							
6	100	50	370	120	1581	3	1

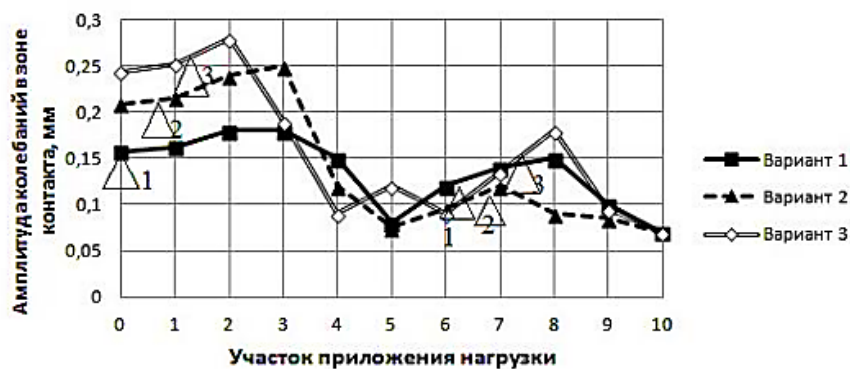


Рис. 2. Изменение амплитуды колебаний в зоне контакта круга и заготовки вдоль оси заготовки для вариантов 1, 2, 3

Из рис. 2, 3 видно, что минимальная амплитуда колебаний на участках 10–7 (см. рис. 1) до конусной опоры, наблюдается для варианта 2 (см. рис. 2). Для дальнейшего определения конструкции оправки закрепим местоположение этой опоры. Минимальная амплитуда на параболическом участке заготовки (точки 7–3) наблюдается для варианта 1 (см. рис. 2, 3). Таким образом, конструкцию оправки, при которой возможны минимальные вибрации

при её «двухопорном» варианте, можно описать через уровень параметров:  $L_B = 0$ ,  $H_{OP} = 50$  мм,  $L_{OP} = 550$  мм. Расстояние между опорами увеличивается, что делает её менее жесткой по сравнению с уже рассмотренными конструкциями оправок, где это расстояние  $L_{OP}$  колебалось от 370 до 500 мм.

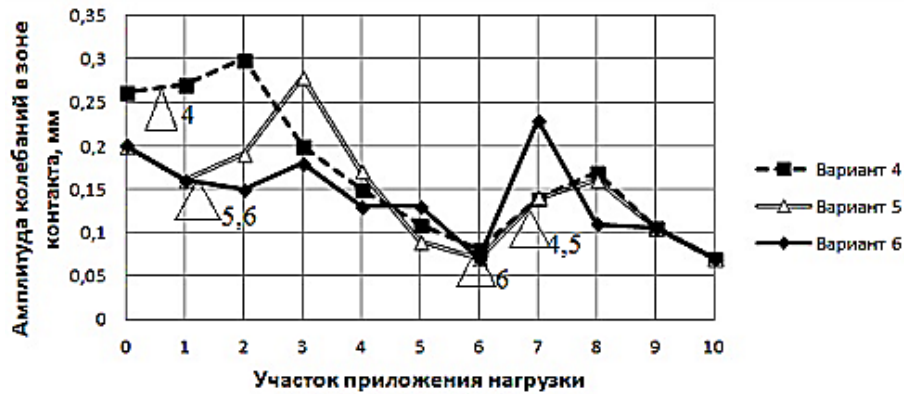


Рис. 3. Изменение амплитуды колебаний в зоне контакта круга и заготовки вдоль оси заготовки для вариантов 4, 5, 6

На рис. 4 представлен фрагмент диаграммы Айнса-Стретта для условий крепления заготовки, приведенных в табл. 1.

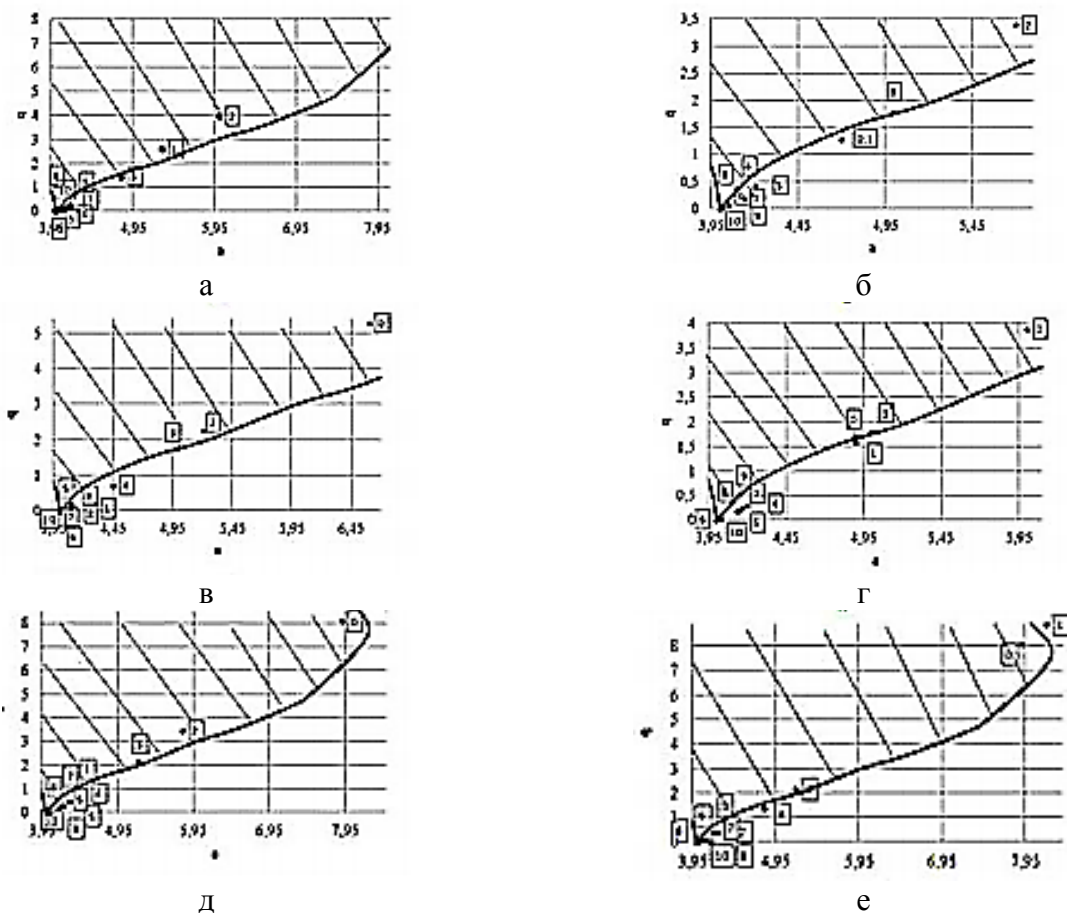


Рис. 4. Фрагмент диаграммы Айнса-Стретта для условий, приведенных в табл. 1. Область неустойчивости заштрихована

Діаграма устійності (см. рис.4, где а, б, в, г, д, е соответственно варианты конструкции опор 1, 2, 3, 4, 5, 6 согласно табл. 1) показала, что наиболее неустойчивыми являются участки заготовки 1, 2 и 3, причем даже минимально возможное относительное расположение опор, как в варианте 6, не убирает полностью неустойчивые состояния оболочки. На участках 10–4 получено устойчивое состояние заготовки тонкостенной оболочки.

Поэтому далее был дополнительно проведен расчет для условий, когда в конструкцию оправки вносились изменения за счет перемещения опоры в цилиндрической части заготовки. То есть, рассматривались конструкции оправок с неподвижной опорой в конической части заготовки и переменным положением относительно нее опоры в цилиндрической части (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные рассматриваемых вариантов конструкции оправок

№ варианта	$L_B$ , мм	$H_{оп}$ , мм	$L_{оп}$ , мм	$\Omega_c$ , Гц	$\Omega_{с0}$ , Гц	n	m
1	0	50	550	130	1345	3	1
2	10		540		1348		
3	20		530		1355		
4	30		520		1361		
5	40		510		1370		

Результаты расчета величин амплитуд колебаний для всех вариантов конструкций оправок (см. табл. 2) представлены на рис. 5.



Рис. 5. Изменение амплитуды колебаний в зоне контакта круга и заготовки вдоль оси заготовки для условий в табл. 2

Изменение положения цилиндрической опоры с последующим изменением величин  $L_B$  и  $L_{оп}$  показало максимальное расхождение амплитуд в точках 1 (размах значений составил 0,13 мм), 2 (размах значений – 0,13 мм), 3 (размах значений – 0,14 мм), где наблюдаются неустойчивые состояния оболочки относительно параметрических колебаний.

Чтобы оценить данные по конструкциям оправок, представленные на рис. 5, получим для каждого варианта оправок среднее значение амплитуды колебаний по длине оболочки, размах их вариации и среднее линейное отклонение величины амплитуды колебаний (табл. 3).

Діаграма устійності (см. рис. 6, где а, б, в, г, д соответственно варианты конструкции опор 1, 2, 3, 4, 5 согласно табл. 2) показала, что неустойчивыми к параметрическим колебаниям для рассмотренных вариантов конструкции оправки являются участки заготовки 1 и 2.

Из рис. 5 и табл. 3 видно, что наиболее приемлемым вариантом конструкции оправки является вариант 3 с параметрами  $L_B = 20$  мм,  $H_{оп} = 50$  мм,  $L_{оп} = 530$  мм.

На диаграмме Айнса-Стретта для условий табл. 2 (рис. 6) представлены устойчивые и неустойчивые относительно параметрических колебаний области обрабатываемой оболочки.

Таблица 3  
Статистические оценки амплитуды колебаний в зоне контакта заготовки и круга для вариантов оправок (по табл. 2)

№ варианта	Среднее значение амплитуды, мм	Размах вариации амплитуд, мм	Среднее линейное отклонение амплитуды колебаний, мм
1	0,132	0,16	0,036
2	0,104	0,14	0,021
3	0,102	0,07	0,005
4	0,122	0,17	0,025
5	0,128	0,14	0,035

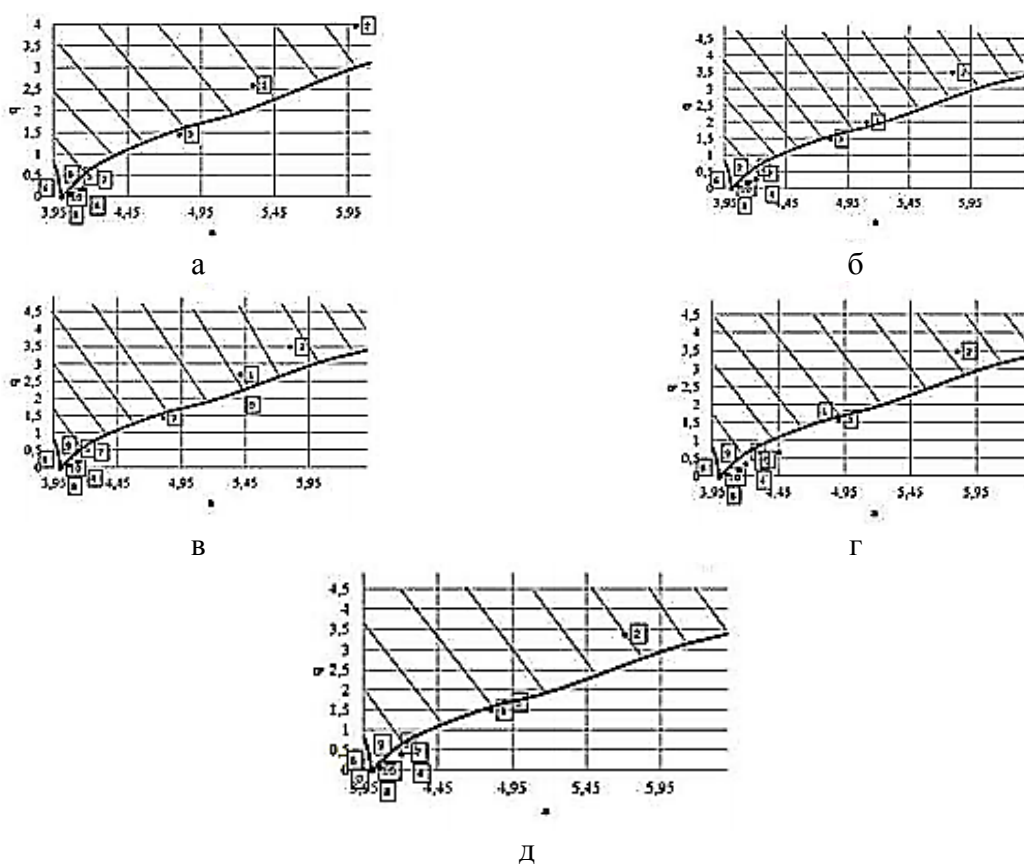


Рис. 6. Фрагмент диаграммы Айнса-Стретта для условий табл. 2. Область неустойчивости заштрихована

На рис. 7 представлена сравнительная характеристика «новой» конструкции оправки и «базовой». Параметры колебаний для конструкций оправок «базового» и «нового» вариантов составят, соответственно, следующие значения: средняя величина амплитуды колебаний 0,133 мм и 0,102 мм, что составляет снижение амплитуды на 23 %; размах вариаций значений амплитуд колебаний в зоне контакта 0,11 мм и 0,07 мм; среднее линейное отклонение 0,014 мм и 0,005 мм. Таким образом, за счет изменения конструкции оправки достигнуто существенное снижение вибраций в зоне контакта, что положительно скажется на точности и качестве обработки изделия.



Рис. 7. Изменение амплитуды колебаний в зоне контакта круга и заготовки вдоль оси заготовки для конструкции оправок «базовой» и «новой»

## ВИВОДЫ

В работе была исследована возможность уменьшения вибраций в зоне контакта алмазного круга и заготовки за счет изменения расположения опор оправки (без увеличения их количества) относительно устанавливаемой на ней заготовки. Расчеты интенсивности колебаний были выполнены при помощи динамической модели, реализованной в пакете Matlab Simulink. В результате с учетом условий, ограничивающих расстановку опор, была получена конструкция «двухопорной» оправки, при которой возможно снижение амплитуды колебаний до 23 % по сравнению с базовым вариантом конструкции оправки. Однако и при использовании «новой» конструкции оправки существуют зоны неустойчивости к параметрическим колебаниям заготовки – оболочки (точки 1 и 2 на рис. 1). Для получения более устойчивой установки заготовки – оболочки в приспособлении необходим расчет трехопорных и четырехопорных оправок.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, И. С. Каракуц, Д. В. Поколенко // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. – 2007. – № 21. – С. 148–155.
2. Гусев В. В. Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, Д. В. Поколенко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2007. – № 2. – С. 14–17.
3. Гусев В. В. Повышение качества алмазного шлифования тонкостенных оболочек из ситалла путем снижения вибраций в технологической системе / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, С. Ю. Олейник // *Наукові праці ДонНТУ*. – 2010. – № 7 (166). – С. 156–167.
4. Гусев В. В. Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситалла / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, С. Ю. Олейник // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2011. – № 6. – С. 14–23.
5. Гусев В. В. Исследование динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, С. Ю. Олейник // *Вісник СевНТУ: збірник наукових праць*. – Вип. 128/2012. Серія: *Машиноприладобудування та транспорт*. – Севастополь, 2012. – С. 60–67.
6. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А. С. Вольмир – М.: Наука, 1972. – 432 с.
7. Шмидт Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт; пер. с нем. В. М. Старжинского. – М.: Мир, 1978. – 336 с.
8. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / [ред. Челомей В.Н.]. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1: *Колебания линейных систем* / [ред. Болотин В. В.]. – 1978. – 352 с.
9. Якушев Н. З. Коническая оболочка под действием подвижных нагрузок / Н. З. Якушев, Р. С. Якушев // *Исследования по теории пластин и оболочек*. – 1975. – № 11. – С. 303–316.
10. Пат. 2258596 С1 Российская Федерация, В24В5/16. Устройство для механической обработки крупногабаритных сложнопрофильных керамических изделий / Суздальцев Е. И., Хамицаев А. С., Харитонов Д. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» № 2003134137/02; заявл. 24.11.03; опубл. 20.08.05, Бюл. № 23. – 4 с.