

УДК 621.923

В.В. Гусев, профессор, д-р техн. наук,

Л.П. Калафатова, профессор, д-р техн. наук,

С.Ю. Олейник, аспирант

Донецкий национальный технический университет

Ул. Артема 58, г. Донецк, Украина. 83001

Lpk04nov@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА УРОВЕНЬ ВИБРАЦИЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты теоретических исследований влияния режимов алмазного шлифования тонкостенных оболочек вращения из ситаллов на вибрации в зоне контакта шлифовального круга и заготовки. Полученные результаты позволяют сделать выводы о факторах, управление которыми делает возможным снижение колебаний в зоне резания.

***Ключевые слова:** алмазное шлифование, ситаллы, тонкостенные оболочки, динамика технологической системы, волнистость поверхности.*

Тонкостенные оболочки вращения из хрупких неметаллических материалов (ХНМ) применяются в аэрокосмической и ракетной технике, что диктует особые требования к качеству таких изделий. К эксплуатационным требованиям относятся:

- особая конструкции изделия (тонкостенная сложнопрофильная высокоточная оболочка вращения из ХНМ), что обеспечивает его аэродинамические и радиотехнические свойства;
- высокая прочность изделия и сохранение заданных свойств при высоких температурах.

В работе рассматриваются режимы алмазной обработки тонкостенных оболочек вращения из хрупких неметаллических материалов (ХНМ), как фактора, влияющего на динамическое поведение технологической системы (ТС) процесса шлифования. Проведенные ранее экспериментальные исследования [1] показали, что вибрации в ТС негативно воздействуют на качество поверхностного слоя детали после алмазного шлифования, что выражается как в ухудшении показателей микро – и макрогеометрии поверхности (прежде всего, её волнистости), так и в увеличении глубины дефектного приповерхностного слоя. С целью устранения названных недостатков тонкостенные оболочки подвергаются операции окончательной механической обработки - притирке, устраняющей микро – и макроотклонения поверхности и профиля детали, которая осуществляется вручную алмазными брусками, а также операции химического травления (удаление дефектного слоя) с последующим ионным упрочнением сформированной поверхности. Эти операции увеличивают трудоемкость изготовления изделий. Поэтому важной задачей является повышение их качества на этапах алмазно-абразивной обработки.

Динамическое поведение рассматриваемой ТС ранее было проанализировано в работах [2]. Используя разработанную динамическую модель алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов [3], можно исследовать влияние различных технологических факторов на интенсивность вибраций в зоне контакта инструмента и заготовки.

Целью настоящей работы является исследование влияния режимов алмазного шлифования тонкостенных оболочек вращения из ситалла на уровень вибраций в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, что позволит разработать технологические способы снижения колебаний в системе и, как следствие, повысить качество и точность обработки.

Алмазное шлифование тонкостенных оболочек вращения происходит в условиях динамической нестабильности процесса, что обусловлено следующими особенностями обработки:

- неравномерной жесткостью заготовки по её длине, которая вызвана консольной установкой заготовки на двухопорной оправке, и, непосредственно, низкой жесткостью самой обрабатываемой тонкостенной оболочки вращения как конструкции;
- неравномерностью сил резания в процессе шлифования при перемещении круга по формируемой поверхности изделия;
- биением и огранкой шлифовального круга.

Расчет колебаний в зоне резания (схема круглого наружного шлифования оболочки при перемещении круга от носка к фланцу [3]) осуществлялся для следующих значений параметров режима: глубина резания (t) для всех рассмотренных вариантов составляла 1 мм; продольная подача шлифовального круга (s) – (0,1; 0,3; 0,5) мм/об; угловая скорость вращения заготовки (ω_d) – (3; 7,64; 11,5) с⁻¹, что соответствует частоте ее вращения (n_d) – (28, 73, 110) об/мин, скорость шлифования (v_k) – (30, 35, 40) м/с.

Нормальная составляющая силы резания P_y определялась по следующей зависимости [6]

$$P_y = 75,3v_k^{-0,55}s^{0,68}t^{0,92}\omega_d^{0,7}. \quad (1)$$

Используемый инструмент - шлифовальный круг АІ 200х10х3х76 АІ-315/250-4-М2-01. Биение и огранка шлифовального круга составляли, соответственно, 0,04 мм и 0,05 мм. При установке шпинделя с биением во время обработки возникает источник колебаний с частотой, зависящей от частоты вращения круга. Для скорости круга $v_k = 30$ м/с ($n_d = 2900$ об/мин) возникает источник возбуждения с частотой 48 Гц. На поверхности круга в процессе обработки в результате его износа образуются три волны, что провоцирует появление еще одной возбуждающей частоты величиной 144 Гц. Соответственно, для других рассматриваемых скоростей круга величины частот будут следующими: $v_k = 35$ м/с - 55 Гц и 169 Гц; $v_k = 40$ м/с - 64 Гц и 193 Гц.

Размеры детали: максимальный диаметр наружной поверхности в цилиндрической части 350 мм, толщина стенки детали 7 мм при толщине заготовки 15-20 мм, общая длина детали 907 мм. Обработка таких изделий осуществляется на специальном токарном станке РТ66202, оснащенный агрегатной шлифовальной головкой и системой прямого копирования. Размеры оправки для базирования заготовки: расстояние между опорами 500 мм, ширина опор 50 мм, вылет опоры оправки от фланца детали 50 мм. Экспериментально найденные значения собственных частот подсистемы «шпиндельный узел-приспособление-заготовка» составили, соответственно, 55 Гц и 123 Гц [2].

Для указанных размерных параметров приспособления и оболочки расчетным путем в конечно-элементном пакете SOLIDWORKS SIMULATION были определены собственная частота оболочки, установленной на оправке приспособления. Расчетная собственная частота соответствует 1343 Гц, форма собственной частоты определяется волновыми числами $n=3$ и $m=1$, где n – число волн по окружности оболочки, m – число волн в продольном направлении.

Принято, что при расчете волнистость поверхности обрабатываемой заготовки, полученная после предыдущего прохода (перехода), не учитывается.

По формуле (1) определялась сила резания для различных сочетаний параметров режима шлифования. Графики изменений значений силы при вариации параметров режима приведены на рис. 1.

Для выбранных сочетаний параметров режима рассчитаем амплитуду колебаний (рис. 2, а; 3, а) и их частоту (рис. 4) в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, а также проведем анализ на устойчивость системы к параметрическим колебаниям заготовки, результаты этого анализа приведены на рис. 2, б и 3, б.

Экспериментально доказано, что при взаимодействии круга с различными участками заготовки по ее длине наблюдаются вибрации различной интенсивности по амплитуде и частоте [2]. В данной работе расчеты проведены для участка, соответствующего координате 0,6 L от носка обрабатываемой заготовки к фланцу (где L - длина детали-оболочки), что соответ-

ствует участку с наибольшей амплитудой колебаний в зоне контакта шлифовального круга и заготовки.

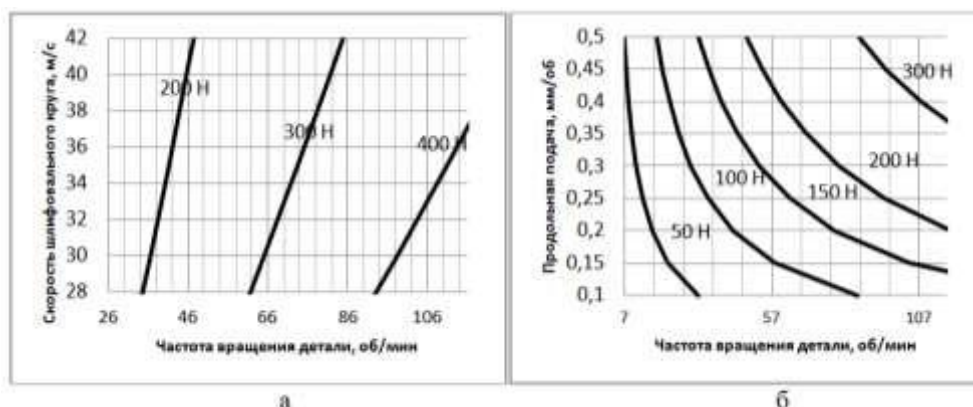


Рисунок 1 - Величина нормальной составляющей силы резания (Н) в зависимости от частоты вращения заготовки n_d (об/мин) и варьируемого параметра режима - (а) скорости круга v_k при $s = 0,5$ мм/об; (б) продольной подачи s при $v_k = 40$ м/с

Для сосредоточенной массивной нагрузки, движущейся по окружности тонкостенной конической замкнутой оболочки с заданной скоростью на заданном расстоянии от ее края, в работе [4] приведено дифференциальное уравнение, описывающее параметрические поперечные колебания стенки оболочки, и осуществлен анализ устойчивости его решений. Выполненные действия позволили получить уравнение по типу Матье для оценки устойчивости системы .

$$\ddot{y} + (a - q \cos 2x)y = 0, \quad (2)$$

где a и q – безразмерные параметры, которые определяют устойчивость, либо неустойчивость системы и зависят от краевых условий (определяются конструкцией приспособления-оправки), геометрии оболочки и физико-механических свойств ее материала, а также характера прилагаемой нагрузки (величиной нагрузки и площадью контакта круга и заготовки); y – радиальное перемещение серединной поверхности рассматриваемого участка оболочки; x – безразмерный параметр, зависящий от угловой скорости вращения заготовки; волнового параметра n ; угла наклона δ оси круга к оси заготовки оболочки (так как на этом участке оболочка не цилиндрическая); времени приложения нагрузки; размеров оболочки и физико-механических свойств ее материала.

Возможность применения уравнения (2) для расчета колебаний оболочки во время алмазно-абразивной обработки рассмотрена и доказана в работе [3].

Уравнение Матье хорошо изучено и используется для оценки динамической устойчивости механических систем, подверженных параметрическим колебаниям. Результаты его решения получены и представлены в виде диаграммы Айнса-Стретта, построенной в плоскости параметров a и q . Решения уравнения носят колебательный характер и зависят от конкретных значений этих параметров уравнения.

При решении задачи устойчивости подробности колебаний малозначительны, так как основную важность представляет тенденция колебательного процесса, то есть, является ли рассматриваемая система устойчивой или неустойчивой. Если амплитуды колебаний остаются ограниченными, то система устойчива, в противном случае имеет место параметрический резонанс и система неустойчива.

Параметрические колебания по внешним проявлениям сходны с вынужденными колебаниями, но отличаются тем, что поддерживаются за счет изменения параметров самой

системы. При определенных сочетаниях динамических параметров малое начальное возмущение приводит к развитию колебаний большой амплитуды. Амплитуды параметрических колебаний в зависимости от значений постоянных системы могут уменьшаться, оставаться ограниченными или возрастать во времени. Конечная амплитуда параметрических колебаний обусловлена нелинейными свойствами реальных систем, проявляющимися при больших амплитудах колебаний.

По результатам расчетов была произведена оценка динамического поведения системы в зоне контакта шлифовального круга и заготовки во время алмазной обработки для вариантов сочетания параметров режима резания, обозначенных на рис. 2 и 3 как $V_{i,j}$, где i – номер варианта величины частоты вращения заготовки, j – номер варианта скорости круга (рис. 2) и j – номер варианта продольной подачи – (рис. 3).

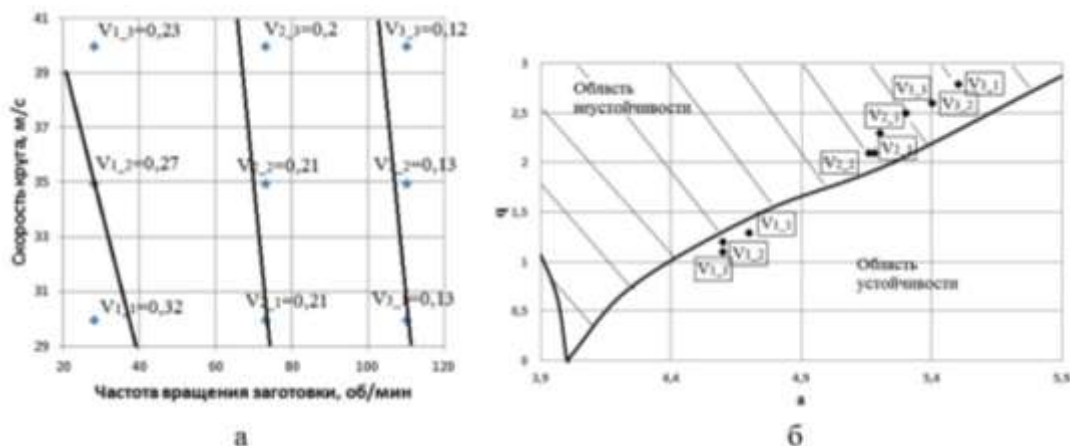


Рисунок 2 – Результаты расчета динамического поведения системы в зоне контакта шлифовального круга и заготовки: а - амплитуда колебаний в зоне контакта в направлении, нормальном к поверхности детали (мм), в зависимости от частоты вращения заготовки n_d и скорости круга v_k при $s=0,5$ мм/об; б - диаграмма устойчивости параметрических колебаний оболочки для вариантов сочетания параметров режима резания (диаграмма Айнса-Стретта)

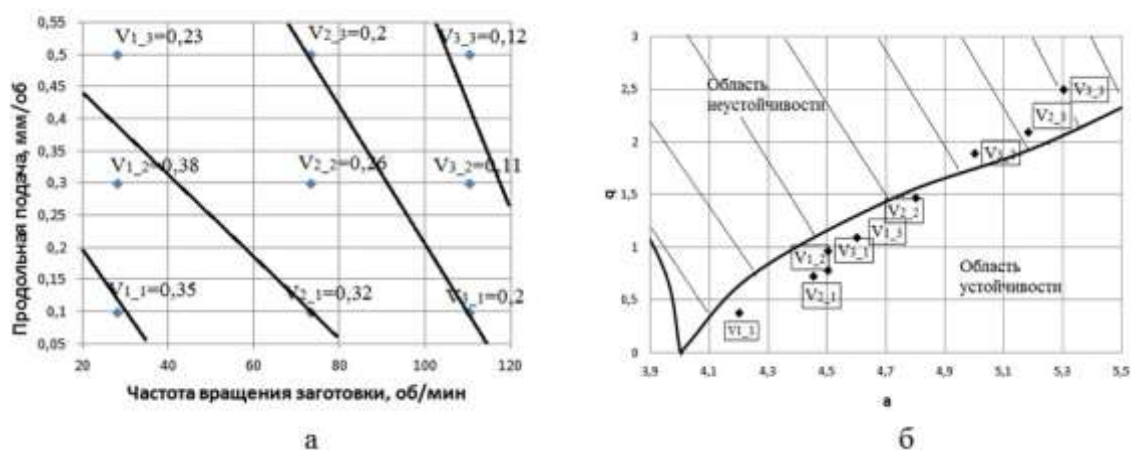


Рисунок 3 – Результаты расчета динамического поведения системы в зоне контакта шлифовального круга и заготовки: а - амплитуда колебаний в зоне контакта в направлении, нормальном к поверхности детали (мм), в зависимости от частоты вращения заготовки n_d и продольной подачи s при $v_k = 40$ м/с; б - диаграмма устойчивости параметрических колебаний оболочки для вариантов сочетания режимов резания (диаграмма Айнса-Стретта)

Амплитуда и частота колебаний оказывают влияние на формирование волнистости поверхности, причем величина амплитуды определяет высоту волнистости, а частота – ее шаг.

Теоретическое исследование влияния режима резания на амплитуду и частоту колебаний в зоне контакта шлифовального круга и заготовки позволило получить комплексную картину процесса.

Увеличение скорости круга с 30 до 40 м/с снижает амплитуду колебаний на 30% при частоте вращения заготовки $n_d = 28$ об/мин и на 5% при $n_d = 73$ об/мин и $n_d = 110$ об/мин (см. рис. 2, а), но повышает частоту колебаний на 5-7 % (см. рис. 4, а). Снижение амплитуды связано с влиянием скорости резания на нормальную составляющую силы резания.

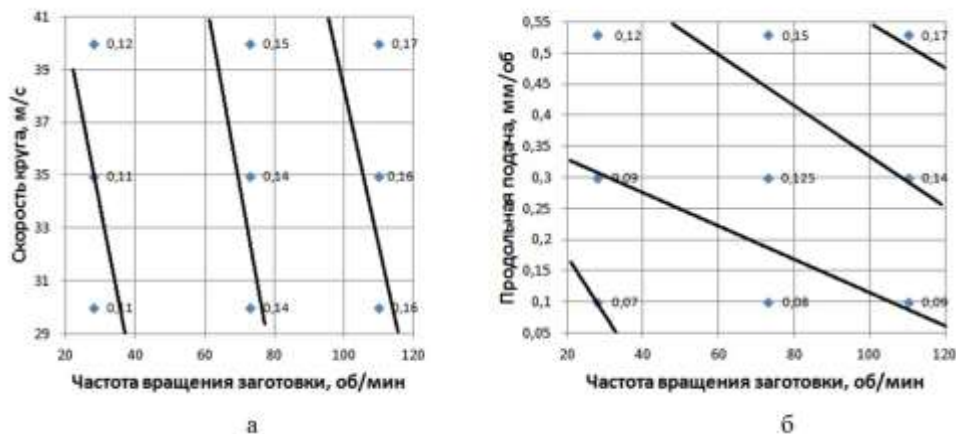


Рисунок 4 - Величина частоты параметрических колебаний оболочки (Гц) в зависимости от: а - частоты вращения заготовки n_d и скорости круга v_k при $s = 0,53$ мм/об; б – от частоты вращения заготовки n_d и продольной подачи s при $v_k = 40$ м/с

Расчитанная амплитуда колебаний при частоте вращения заготовки 73 и 110 об/мин (см. рис. 2, а) меньше, чем при $n_d = 28$ об/мин в 2-2,5 раза. Однако, анализ на устойчивость (см. рис. 2, б) показывает, что обрабатываемая оболочка при частоте её вращения 73 и 110 об/мин находится в неустойчивом состоянии, то есть, амплитуда колебаний при дальнейшем продолжении процесса обработки будет увеличиваться. Это связано с изменением величины частоты возбуждения параметрических колебаний, которая зависит от скорости движения нагрузки (угловой скорости вращения заготовки), и формы колебаний оболочки, описываемой параметрами n и m .

Шлифование с большей из рассмотренных вариантов подачей ($s = 0,5$ мм/об) при расчете вибраций дает более низкую мгновенную амплитуду колебаний, в среднем, на 35 % меньшую, чем для варианта с подачей $s = 0,1$ мм/об (см. рис. 3, а), однако оболочка находится в неустойчивом состоянии. То есть, в процессе обработки амплитуда колебаний увеличится.

Таким образом, интенсификация режимов резания снижает мгновенную амплитуду колебаний, но при этом оболочка находится в неустойчивом состоянии, что может привести к резкому увеличению вибраций и параметрическому резонансу, которые отрицательно скажутся на точности и качестве обработки изделия.

На основании результатов выполненных расчетов можно сделать выводы, что изменение параметров режима резания позволяет управлять динамической ситуацией в ТС за счет следующих факторов:

- 1) силового фактора – управление колебаниями путем управления силой резания за счет изменения частоты вращения заготовки;
- 2) фактора частоты – управление колебаниями путем управления частотой возбуждения параметрических колебаний за счет изменения частоты вращения заготовки;
- 3) фактора времени - управление колебаниями путем управления длительностью воздействия силовой нагрузки на оболочку, реализуется путем изменения продольной подачи;

4) фактора устойчивости - любое сочетание параметров режима шлифования должно стремиться к обеспечению устойчивого состояния оболочки относительно параметрических колебаний.

Для возможности механической обработки оболочки с интенсивными режимами необходимо повышать жесткость подсистемы «приспособление-заготовка» путем разработки более совершенной конструкции оправки.

Библиографический список использованной литературы

1 Гусев В.В. Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П.Калафатова, Д.В. Поколенко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. –2008. – Вип.74. – С.84-91.

2 Гусев В.В. 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.

3 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: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — 12. - Вип. 128. - С. 60-67.

4 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.

Поступила в редакцию

Гусев В.В., Калафатова Л.П., Олейник С.Ю. Теоретичне дослідження впливу режимів обробки на рівень вібрацій при алмазному шліфуванні тонкостінних оболонок з крихких неметалічних матеріалів.

У статті представлені теоретичні дослідження впливу режимів алмазного шліфування тонкостінних оболонок обертання з ситалів, на вібрації в зоні контакту шліфувального круга і заготовки. Отримані результати дозволяють зробити висновки про чинники, керування якими дозволить понизити вібрації в зоні контакту.

Ключові слова: алмазне шліфування, ситали, тонкостінні оболонки, динаміка технологічної системи, хвилястість поверхні.

Gusev V.V., Kalafatova L.P., Oleynik S.Yu. Theoretical research of influence of cutting conditions on level of vibrations at diamond grinding of the thin-walled shells from brittle non-metal materials.

The authors of the article are presented the theoretical researches of influence of the cutting conditions of the diamond grinding of the thin-walled shells of glass-ceramic on vibration in the area of contact of wheel and part. The results allow to draw conclusion about factors. Management of factors allow to reduce oscillation in the cutting area.

Keywords: diamond grinding, glass-ceramic, thin-walled shells, dynamics of the technological system, waviness of surface.