

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.923: 621.922

В.В. Глебов, Д.А. Игнатьев, М.Е. Егоров

### УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Высокая хрупкость неметаллических конструкционных материалов определяет сложность выбора оптимальных условий механической обработки. Неметаллические конструкционные материалы широко используются при создании современных машин. Для обработки указанных материалов применяются в основном методы шлифования, осуществляемые путем интенсивного трещинообразования. Рассмотрены критерии при зарождении и распространении трещины в теле детали из хрупких неметаллических материалов. Предложено использовать специальный инструмент, оснащенный виброгасителем, с дискретно управляемыми упругими свойствами.

*Ключевые слова:* стекло, шлифование, трещина, неметаллические конструкционные материалы, виброгаситель, жесткость, демпфирование.

При изготовлении современной техники сохраняется общая тенденция к постоянному повышению требований, предъявляемых к исполнительным поверхностям машин и приборов, что требует совершенствования технологических процессов, одновременно обеспечивающих, как высокое качество, так и высокую производительность обработки. Типовыми деталями, применяемыми в различных конструкциях, являются призмы, шайбы, плитки, пластины и т.д. с протяженными плоскими рабочими поверхностями высокой точности, высокими требованиями к качеству поверхностного слоя.

Такие детали изготавливают из оптических стекол и ситаллов, различных марок, керамики, относящихся к группе хрупких неметаллических материалов (далее стекла), которые находят широкое применение вследствие благоприятного сочетания их оптических, механических и эксплуатационных свойств [2].

Высокая твердость стекла обуславливает при изготовлении деталей, использование методов абразивной обработки, в частности, для случая обработки плоских поверхностей – торцовое шлифование.

Если рассмотреть данный процесс с точки зрения механики разрушения, то в результате контактного взаимодействия двух твердых тел образуются области с напряженным состоянием. С ростом напряжения в материале происходит накапливание микроповреждений, что в дальнейшем приводит к зарождению очага разрушения (исходной трещины). Зависимость максимальной величины напряжения от амплитуды колебаний  $A$ , силы прижима  $F$  и радиуса округления абразивных зерен  $R$ , согласно [4], имеет вид

$$\sigma_{\max} = 2,9n^{0,3}\eta^{0,3}A^{0,45}F^{0,7}R^{0,15}, \quad (1)$$

где  $n$  - число зерен абразива, приходящегося на единицу площади торца инструмента;  $\eta$  - постоянная, зависящая от свойств абразива и материала детали.

Описание процесса разрушения можно представить иллюстрацией (рис. 1). Вначале при внедрении зерна, форма которого принята сферической, в обрабатываемый материал контакт характеризуется как упругий (рис. 1, а), но при достижении максимума касательных напряжений под поверхностью возникает зона пластичности (ЗП) (рис. 1, б). На поверхности у границы площадки контакта, в зоне растягивающих напряжений, появляются отдельные дуговые трещины. При больших нагрузках таких трещин становится больше, и длина их увеличивается. В итоге дуговые трещины сходятся, образуя одну или несколько кольцевых трещин, вложенных одна в другую. При дальнейшем повышении нагрузки кольцевая трещина перерастает в коническую (КТ) в виде усеченного конуса (рис. 1, б), так называемого конуса Герца [4]. Согласно исследованиям [4], при вдавливании зерна и достижении максимальной величины силы прижима  $F$ , вызывающей максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ , на поверхности появляется кольцевая трещина диаметром

$$d = 2,23 \sqrt[3]{\frac{R F}{E}}, \quad (2)$$

где  $E$  - модуль упругости обрабатываемого материала.

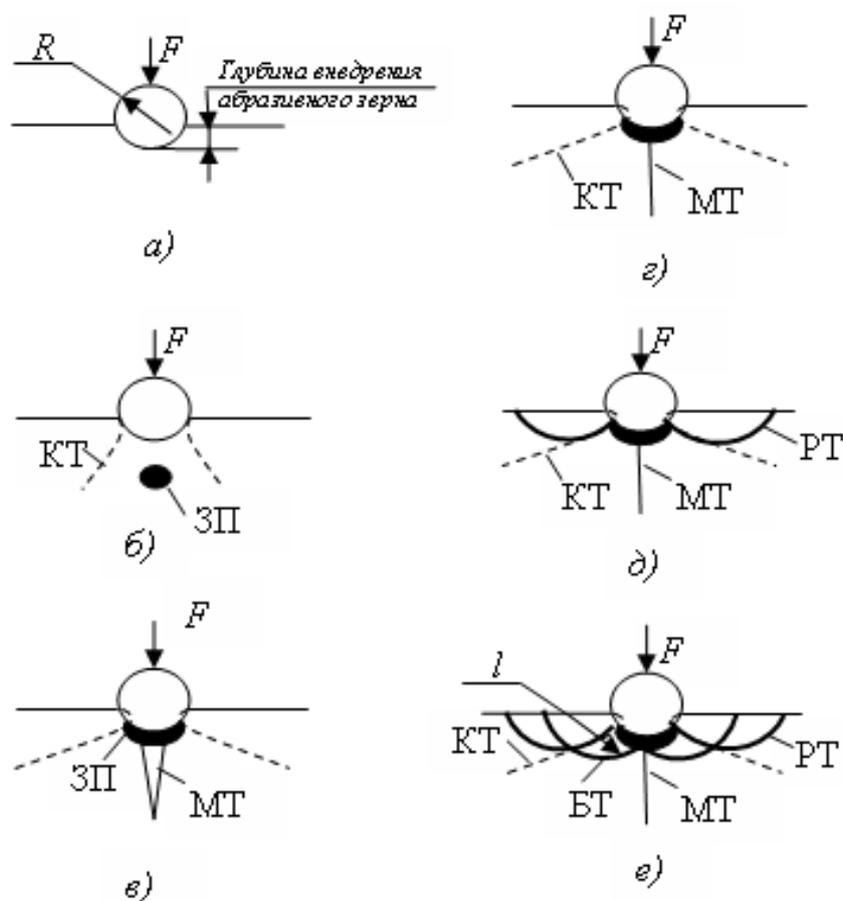


Рис. 1. Схема образования трещины

Кроме того, увеличение нагрузки приводит к увеличению зоны, где возникает пластическая деформация, у основания которой появляется медианная трещина (рис. 1, в), что, в свою очередь, при определенных условиях может привести к неисправимому браку. При разгрузке медианная трещина закрывается за счет сжимающих сил упругодеформированной части материала (рис. 1, г). Однако при разгрузке на поверхности образца напряжения меняют знак, и при остаточной силе, равной примерно половине максимальной, возникает система радиальных трещин (РТ) (рис. 1, д). Такие трещины зарождаются у краев контактной

площадки и растут при дальнейшей разгрузке. После полного снятия нагрузки под пластическидеформированной зоной возникают большие растягивающие напряжения, которые создают систему боковых трещин (БТ) (рис. 1, *e*). Эти трещины берут свое начало от границы пластической зоны. В момент снятия нагрузки, что соответствует моменту выхода абразивного зерна из зоны контакта с обрабатываемой поверхностью, при нагрузке, составляющей примерно 10 % от максимальной, происходит образование трещин, ориентированных почти параллельно обрабатываемой поверхности, которые при росте вверх принимают блюдцеобразную форму. Пересечение радиальных трещин с боковыми приводит к образованию сколов.

Формула [4] для радиуса образовавшейся трещины имеет вид

$$l = \sqrt[3]{\left(\frac{U_k^2}{(dK_{ID})^2}\right)}, \quad (3)$$

где  $K_{ID}$  – коэффициент интенсивности напряжений [4];  $U_k$  – кинетическая энергия удара [4].

Механизм хрупкого разрушения указанных материалов позволяет прийти к выводу о возможности многократного повышения производительности шлифования при выполнении условия, когда абразивные зерна будут однократно создавать на поверхности кольцевые трещины радиусом  $l$  на расстоянии друг от друга, равном  $1,22 \dots 1,75d$ , в зависимости от марки обрабатываемого материала и припуска на обработку.

Указанное может быть достигнуто путем подбора параметров режущей части инструмента, режимов обработки, а также параметров дополнительных относительных колебательных движений.

С другой стороны, стекло склонно к хрупкому разрушению, вибрации, сопутствующих шлифованию, что приводит к образованию дефектного поверхностного слоя, имеющего трещины и сколы [2]. Эти особенности процесса шлифования стекла затрудняют достижение требуемого качества изделий при высокой производительности и требуют применения дорогостоящего специального инструмента и дополнительных средств технологического оснащения, в том числе и адаптивных.

Для снижения интенсивности колебаний шлифовальный круг (ШК) оснащают виброгасителями различных типов [3]. При этом тип виброгасителя определяет колебательное поведение механической системы ШК, качество и производительность процесса шлифования, а также ресурс и другие эксплуатационные свойства ШК.

Теория и практика показывают, что при использовании однокаскадного виброгасителя (имеющего один упругий элемент) в механической системе ШК на определенных скоростях резания, в зависимости от жесткости упругого элемента, возникает резонансное состояние. Это приводит к аварийному состоянию технологической системы (снижению качества обработанной поверхности, разрушению обрабатываемой заготовки). Во избежание таких последствий приходится снижать скорость резания на этапе чистовой обработки, что негативно влияет на производительность шлифования.

Применение ШК, оснащенного двухкаскадным виброгасителем, позволяет, благодаря выбору необходимого соотношения жесткостей упругих элементов, осуществлять шлифование на высоких скоростях, избегая резонансного состояния. Высокие скорости резания в безрезонансной зоне обеспечивают достаточно высокое качество обрабатываемой поверхности при относительно высокой производительности.

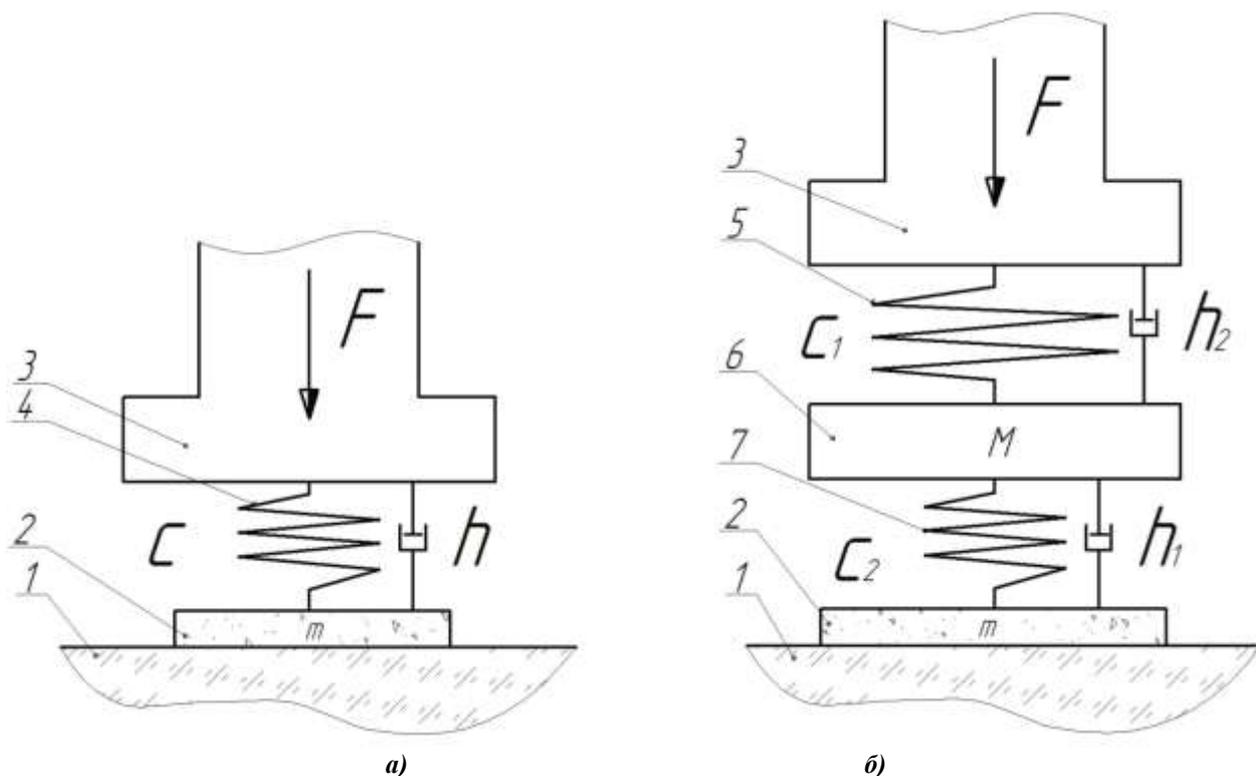
При выполнении технологических задач, целью которых является обеспечение высокого качества обработки, без ограничений по производительности, целесообразным является применение ШК с однокаскадным виброгасителем.

В условиях, когда выполняется совмещенная (по качеству и производительности) технологическая задача, целесообразным является применение ШК с двухкаскадным виброгасителем.

Таким образом, актуальной является задача по созданию технологического процесса, совмещающего в себе возможности обеспечения высокопроизводительного предварительного и финишного шлифования одним инструментом.

Решение задачи по достижению требуемого качества изделий при высокой производительности на различных этапах обработки возможно за счет применения ШК, совмещающего в своей конструкции преимущества указанных двух типов ШК и лишённого их недостатков. Кроме того, уровень вибраций должен быть достаточен для достижения максимальной величины напряжения  $\sigma_{\max}$  и при этом не вызывать появления магистральных трещин, приводящих к разрушению обрабатываемых заготовок [4].

В тоже время вариант использования ШК с виброгасителем, число каскадов у которого более двух, был исследован и отвергнут авторами [3] из-за сложности колебательного поведения и, как следствие, проблематичности точного выбора параметров процесса шлифования.



**Рис. 2. Расчетные схемы механических систем ШК с одно- (а) и двухкаскадным (б) виброгасителем:**

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — абразивный сегмент ШК; 3 — шпиндель станка с закрепленным на нем корпусом ШК; 4, 5, 7 — упругие элементы виброгасителей; б — промежуточный элемент двухкаскадного виброгасителя

Для описания колебательных процессов в системе «инструмент-заготовка» при использовании ШК, оснащенных одно- и двухкаскадным виброгасителями, целесообразно применять методы теоретической механики, в частности, элементы теории малых колебаний.

Упрощенные схемы для расчета механических систем рассматриваемых ШК приведены на рис. 2. Считаем, что на ШК действует сила  $F$ , вызывающая колебания с амплитудой  $A$ ; коэффициент демпфирования и жесткость упругого элемента 4 однокаскадного виброгасителя соответственно равны  $h$ ,  $c$ ; жесткости и коэффициенты демпфирования упругих элементов 5 и 7 первого и второго каскадов двухкаскадного виброгасителя – соответственно  $c_1$ ,  $h_1$  и  $c_2$ ,  $h_2$ . Вращающаяся часть 3 станка (в данном случае шпиндель) с закрепленным на ней корпусом ШК имеет массу, большую по сравнению с массой виброгасящей системы, и в расчетах

не учитывается, а промежуточный элемент  $b$  двухкаскадного виброгасителя, установленный между упругими элементами первого и второго каскадов, — массу  $M$ , шлифовальные сегменты 2 имеют общую массу  $m$ .

Для ШК с однокаскадным виброгасителем расчетная схема (рис. 2, *a*) сведена к механической системе с одной степенью свободы. При этом зависимость амплитуды  $A$  колебаний рабочей части ШК от круговой частоты  $\omega$  имеет вид [1]

$$A = \frac{F_c}{(c - m\omega^2)^2 + h^2\omega^2} \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что для заданных технологических условий, характеризующих определенными значениями  $F$  и  $\omega$ , конструктивно влиять на рассматриваемый колебательный процесс можно только изменением значений жесткости и коэффициента демпфирования упругого элемента виброгасителя.

Механическая система инструмента с двухкаскадным виброгасителем (рис. 2, *б*) имеет две степени свободы. При этом зависимость, характеризующая амплитуду колебательного процесса шлифовальных сегментов, имеет вид [7]

$$A = F_c \sqrt{\frac{c_1^2 + h_1^2\omega^2}{(c_1 + c_2 - m\omega^2)^2 + (h_1 + h_2)^2\omega^2}} \quad (5)$$

Из приведенной зависимости амплитуды колебаний рабочей части ШК от частоты следует, что на параметры колебательного процесса в данном случае можно влиять изменением параметров виброгасителя: жесткостей, коэффициентов демпфирования  $c_1, h_1, c_2, h_2$  и массы  $m$ .

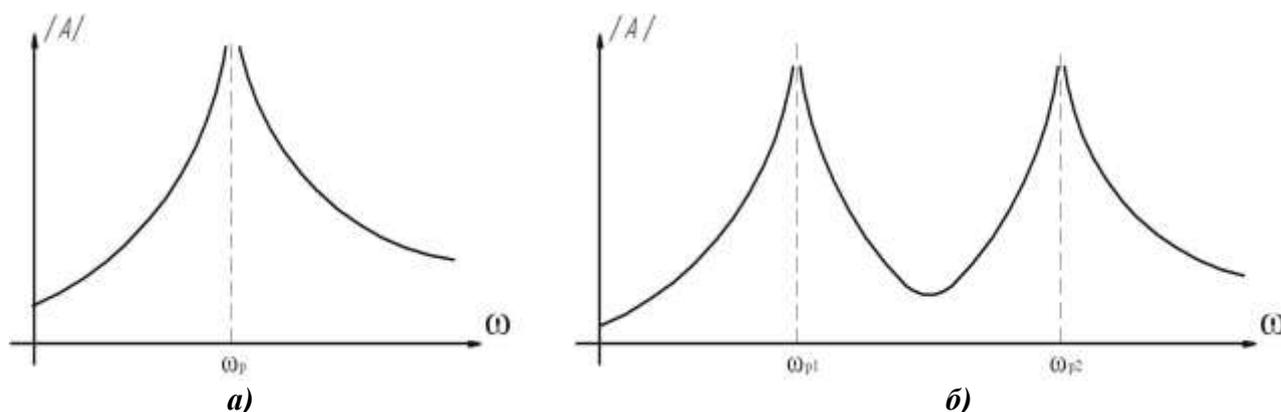


Рис. 3. Зависимость величины  $A$  от круговой частоты  $\omega_c$  ШК с одно- (*a*) и двухкаскадным (*б*) виброгасителем

Далее представлены графики зависимости амплитуды  $A$  рабочей части ШК от круговой частоты  $\omega$  для случая использования одно- (рис. 3, *a*) и двухкаскадного (рис. 3, *б*) виброгасителя.

Практический интерес представляет разность  $\Delta\omega_p$  резонансных частот, которая определяет ширину интервала безрезонансного состояния механической системы ШК [1]:

$$\Delta\omega_p^2 = c_2 \sqrt{\frac{1}{m^2}(1+a)^2 + \frac{1}{M^2} + 2\frac{(1-a)}{Mm}} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что увеличение жесткости  $c_2$  и соотношения жесткостей  $a = c_1/c_2$  приведет к росту значений обеих резонансных частот, а увеличение массы  $m$  — к их уменьшению.

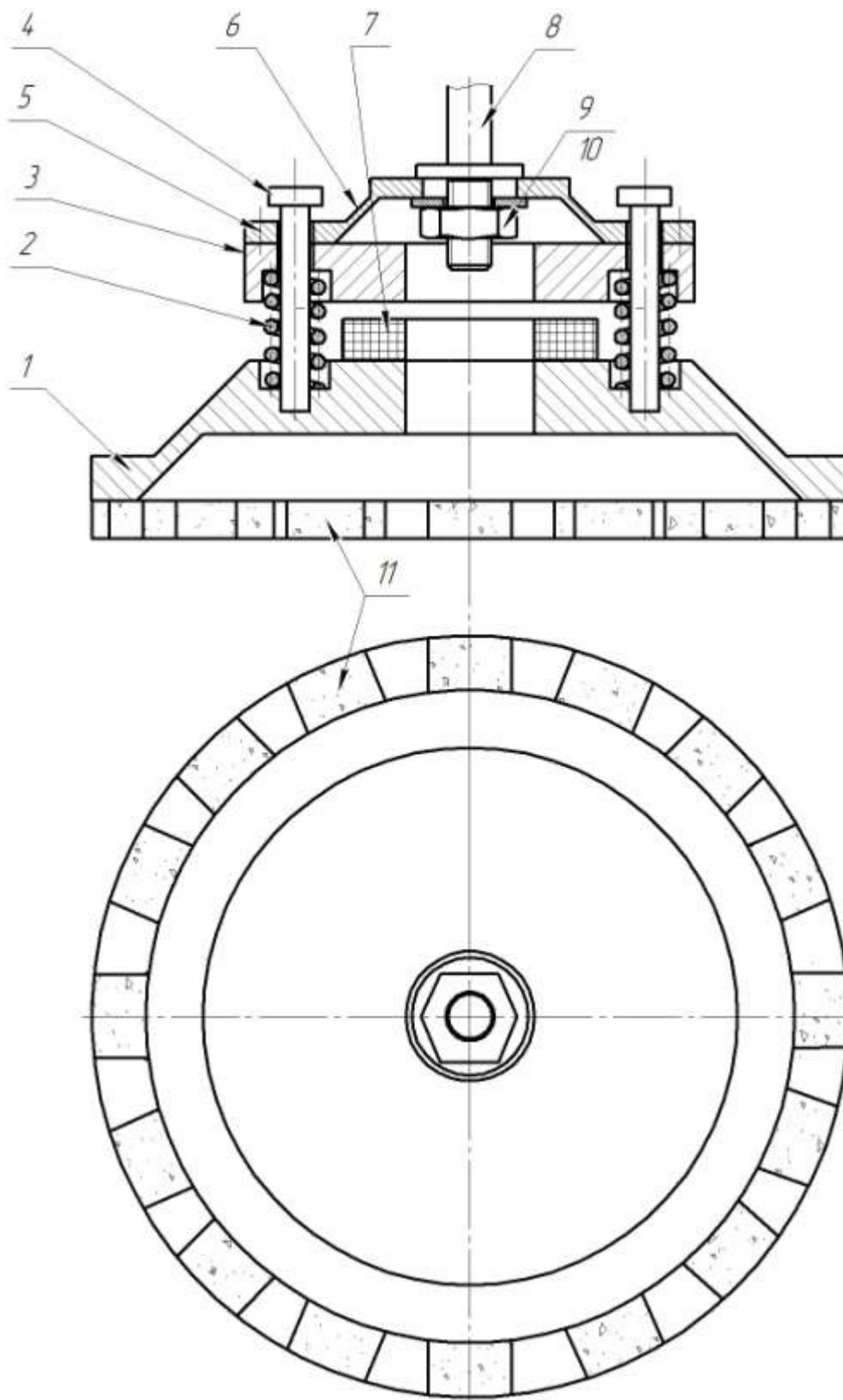


Рис. 4. Инструмент, оснащенный упругим элементом с изменяемой жесткостью

Жесткость  $c_1$  и коэффициенты демпфирования  $h_1$  и  $h_2$  определяются условием обеспечения требуемого амортизационного эффекта при взаимодействии ШК с заготовкой. Несмотря на то, что жесткость  $c_1$  не может изменяться в широком диапазоне, а коэффициенты сопротивления  $h_1$  и  $h_2$  для металлических упругих элементов малы, путем подбора значений жесткости  $c_2$ , а также соотношения жесткостей двух упругих элементов  $a$  и массы рабочей части  $m$  возможно обеспечить работу ШК вне зоны резонанса во всем диапазоне значений  $\omega$  и  $c_1$ . Это позволяет осуществлять поиск оптимальных конструктивных параметров двухкаскадного виброгасителя, изменяя значения  $c_1$  и  $m$ , для выбранного скоростного режима. Представленные зависимости описывают влияние конструктивных параметров виброгасителя на колебательный процесс в системе «инструмент-заготовка» и могут быть использованы при проектировании ШК с учетом конкретных технологических условий.

Таким образом, можно сделать вывод, что две рассматриваемые схемы механической системы ШК характеризуются своими достоинствами и недостатками с технологической точки зрения. Применение гибридной и управляемой схем виброгашения позволило бы на разных технологических этапах обработки использовать сочетание двух рассмотренных схем. Конструкция инструмента, позволяющая изменять в процессе обработки жесткость  $c_2$ , обеспечивает возможность управления его колебательным поведением как при необходимости повышения производительности с обеспечением определенного значения амплитуды  $A$ , так и при обеспечении высокого качества обработки на финишном этапе, когда значение амплитуды  $A$  минимизируется.

Вариант конструктивного исполнения такого инструмента представлен на рис. 4. Он состоит из металлического корпуса 1 с присоединенным через винтовые цилиндрические пружины 2, массивным ферромагнитным кольцом 3, которое свободно перемещается по направляющим 4 в вертикальном направлении. К ферромагнитному кольцу с помощью винтов 5 присоединена тарельчатая пружина 6. Через монтажное отверстие в тарельчатой пружине 6 ШК закрепляется на шпинделе станка 8 с помощью гайки 9 и кольца 10. На корпусе 1 с одной стороны жестко закреплены шлифовальные сегменты 11, образующие прерывистую рабочую часть, с другой – силовой электромагнитный элемент 7.

В процессе работы ферромагнитное кольцо и электромагнитный силовой элемент могут свободно перемещаться в вертикальном направлении, обеспечивая возможность колебаний рабочей части инструмента в соответствии с выбранным значением амплитуды  $A$ .

ШК предназначен для обработки плоских поверхностей. Удаление припуска с обрабатываемой поверхности осуществляется в результате контакта шлифовальных сегментов с обрабатываемой поверхностью при вращении и при продольной или круговой подаче заготовки в направлении, перпендикулярном оси вращения ШК, при приложении к нему постоянной или плавно изменяющейся статической нагрузки в направлении оси вращения. Он может использоваться при проведении совмещенного предварительного и финишного шлифования в технологических условиях, при которых обеспечивается постоянный контакт всей рабочей поверхности круга с поверхностью обрабатываемой заготовки или группы заготовок.

#### Библиографический список

1. Вибрации в технике: справочник: в 4-х т. / под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
2. **Глебов, В.В.** Шлифовальный инструмент с виброгасителем для обработки и ремонта плоских поверхностей на деталях из хрупких неметаллических материалов / В.В. Глебов, В.М. Сорокин, Д.А. Игнатьев // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й международной практической конференции выставки. Ч. 1. – СПб.: СПбГУ. 2006. – С. 356–362.

3. **Глебов, В.В.** Анализ и совершенствование шлифовальных кругов с виброгасителем для обработки хрупких материалов / В.В. Глебов [и др.] // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2005. Вып. 1. – С. 63–66.
4. **Марков, А.И.** Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков, А.М. Дальский // Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.02.2010*

**V.V. Glebov, D.A. Ignatyev, M.E. Yegorov**

### **THE MANAGEMENT OF VIBRATORY CONDUCT OF THE FOR GRINDING OF FRAGILE NON-METALLIC MATERIALS**

High fragility of non-metallic materials determines complexity of a choice of optimum conditions of machining. Non-metallic constructional materials are widely used at creation of modern machines. To processing the specified materials are applied in the basic methods of grindings which are carried out by intensive cracking. Criteria of origin and distribution of a crack in a body of a detail from fragile non-metallic materials are considered. It is suggested to use special instrument supplied with vibration damper with guided elastic properties.

*Key words:* glass, grinding, crack, non-metallic constructional materials, vibration damper, hardness, damping.