УДК 621.9:531.1

Б.М. Бржозовский, И.Н. Янкин, Д.А. Хайров
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Россия
Тел./Факс: (8452) 99-86-39; *E-mail:* kimo@sstu.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЗАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ПОДСИСТЕМ СТАНКА

В статье на примере процесса правки абразивных кругов приведены результаты исследования динамических явлений, сопровождающих обработку неоднородных материалов. На основе компьютерной модели процесса правки показано влияние соотношения динамических параметров подсистем абразивного круга и правки на качество правленого абразивного инструмента. Предложен показатель оптимальной динамической настройки системы правки по критерию качества правленого инструмента.

Ключевые слова: *динамическая система, колебания, качество правки.*

Введение

Резание неоднородных материалов, включающих различные структурные составляющие, отличается переменными условиями взаимодействия инструмента с деталью, что вызывает значительные динамические воздействия на упругую систему станка и приводит к нежелательным динамическим явлениям. К такой группе материалов можно отнести абразивный инструмент, который структурно состоит из различных компонентов – абразивных зерен, связки и продуктов засаливания пор в виде частиц металла в межзеренных пустотах.

Абразивный инструмент широко используется на операциях шлифования. Из существующих его разновидностей внутреннее шлифование наиболее трудоемко и отличается высокой скоростью потери инструментом режущих свойств, что приводит к необходимости включения в цикл обработки отверстия как минимум одной правящей операции. Формируемое на операции правки качество абразивного круга во многом определяет качество процесса резания на последующей операции шлифования.

Процесс правки круга представляет собой высокоскоростное ударное взаимодействие правящего инструмента с поверхностным слоем (ПС) абразивного круга и сопровождается высоким уровнем динамического возмущения упругой системы станка. Возбуждаемые при правке динамические явления оказывают существенное влияние на процесс формирования рельефа ПС круга и его режущие свойства.

В свою очередь, интенсивность и ориентация различных форм колебаний, сопровождающих процесс правки, подчиняются динамическим свойствам подсистем абразивного круга и правящего инструмента. Поэтому важной задачей обеспечения качества процесса правки является создание таких динамических свойств станка в области зоны резания, которые минимизируют нежелательные формы колебаний и способствуют инициированию колебаний полезных форм [1].

В статье на основе моделирования динамических явлений при правке абразивного инструмента рассмотрено влияние параметров подсистем абразивного круга и правки на качество обработки и предложен критерий оптимальной динамической настройки станка.

Модель процесса правки

Процесс правки на внутришлифовальных станках реализуется, как правило, путем обтачивания абразивного круга правящим инструментом в виде алмазного карандаша. В обработке участвуют две подсистемы – подсистема абразивного круга и подсистема правящего инструмента. С позиций динамики взаимодействие подсистем можно условно отразить схемой, изображенной на рис. 1. Здесь обозначено: X_a, X_k – осевые подсистемы; Y_a, X_k – нормальные подсистемы; Z_a, Z_k – тангенциальные подсистемы абразивного круга и правящего инструмента. Каждая из указанных подсистем может быть развита вглубь упругой системы станка в соответствии с его конструктивными особенностями и требованиями адекватности модели.

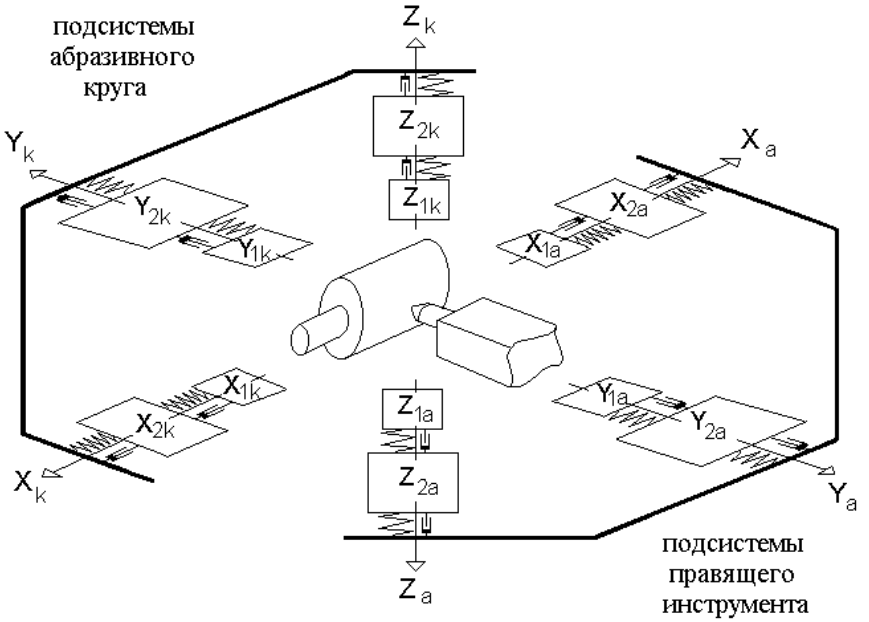


Рис. 1. Схема подсистем при правке абразивного круга

В приведенном примере движения в каждой из шести подсистем описываются уравнениями связанных осцилляторов, находящихся под действием произвольной внешней силы:

$$m_i\ddot{x}_i + c_i\dot{x}_i + p_i(x_i - x_{i+1}) = \begin{Bmatrix} P(t)\Big|_{t_1}^{t_2} \\ 0\Big|_{t_2}^{t_3} \end{Bmatrix}, \qquad (1)$$

$$m_{i+1}\ddot{x}_{i+1} + c_{i+1}\dot{x}_{i+1} + p_{i+1}xi + 1 - p_i(x_i - x_{i+1}) = 0,$$

где инерционные характеристики подсистем описываются колебательными массами m_i, диссипативные характеристики – коэффициентами диссипативных сил c_i, а упругие характеристики – жесткостями p_i вдоль обобщенных координат. Возмущение подсистем представлено в виде потока импульсов сил, формирующихся в результате столкновения фрагментов абразивного круга с вершиной правящего инструмента. В условиях относительно малых глубин правки, составляющих для внутришлифовальных станков от 1мкм при чистовой и до 12 мкм при черновой правке, контакт алмаза с кругом носит прерывистый характер. На участке времени t_1-t_2 алмаз находится в контакте с фрагмен-

том абразивного круга под действием нарастающей силы $P(t)$, а на участке времени t_2-t_3 он теряет контакт до момента столкновения со следующим фрагментом.

При формировании выражения для расчета сил правки принято, что наибольшей значимостью обладают импульсы, возникающие при столкновении вершины алмаза с абразивными зернами как наиболее прочными фрагментами абразивного круга. В свою очередь, малые глубины взаимодействия алмаза с зернами обуславливают их разрушение преимущественно за счет развиваемых в контактной области сжимающих напряжений. В этой связи закон нарастания силы в течение времени контакта абразивного зерна с вершиной правящего инструмента может быть описан в следующем виде:

$$P(t) = \frac{64[\sigma]_{сж}\rho_з S}{\pi^2} Sin(\omega t),\ \omega = \frac{\pi V}{2\sqrt{2\rho_a S}}, \qquad (2)$$

где $[\sigma]_{сж}$ – предел прочности материала зерна на сжатие; $\rho_з$, ρ_a – радиусы вершин зерна и алмаза; S – глубина взаимодействия в направлении линии, связывающей центры вершин алмаза и зерна; V – скорость столкновения; ω – круговая частота взаимодействия, которая определяется по длительности полупериода нарастания импульса силы. Гипотетический временной интервал длительности полупериода действия силы определяется, исходя из глубины взаимодействия, относительной скорости и радиуса закругления вершины алмаза по формуле $t = 0...\frac{\sqrt{2\rho_a S}}{V}$. Фактическая длительность взаимодействия зерна с алмазом ограничивается моментом скалывания или объемного разрушения абразивного зерна при достижении предельных контактных напряжений.

Действие потока импульсов сил с фронтом нарастания, подчиняющемуся гармоническому закону (2), приводит к образованию в динамической системе переходных движений, которые являются результатом сложения вынужденных колебаний, собственных колебаний с начальными условиями и свободных сопровождающих колебаний.

Описанные выше положения легли в основу создания компьютерной модели правки, направленной на исследование процесса формообразования рельефа рабочей поверхности абразивного круга в условиях колебаний формообразующих подсистем. Она включает следующие модельные решения:

- модель абразивного круга, описывающая случайное расположение и случайную геометрию абразивных зерен в его поверхностном слое в соответствии с размерной характеристикой абразивной фракции и структурными характеристиками инструмента;
- модель технологического движения абразивного круга, реализующая его вращение, поперечную и продольную подачи в соответствии с заданным режимом правки;
- модель динамики процесса правки, описывающая колебательные движения подсистем абразивного круга и правящего инструмента в соответствии с их динамическими характеристиками и возмущением процессом правки [2];
- модель силового взаимодействия абразивного круга с правящим инструментом, формирующая импульсы сил за счет столкновения фрагментов ПС круга с вершиной алмаза с учетом их реальных траекторий и скоростей, являющихся результатом сложения технологического и колебательного движений;
- модель формирования рельефа ПС круга как результат хрупкого ударного разрушения его фрагментов с вершиной правящего инструмента в соответствии с характеристиками абразивных зерен и параметрами ударных импульсов.

Оценка качества процесса правки

При заданных прочностных и износных параметрах материала абразива и связки круга режущие свойства инструмента определяются рельефными свойствами ПС круга, которые формируются в процессе правки. Таким образом, под качеством процесса правки следует понимать ее способность создать в ПС круга высокую плотность режущих элементов абразивных зерен. В этой связи оценку качества правки целесообразно выполнить по следующим наиболее информативным показателям:

- по функции распределения вершин абразивных зерен по глубине профиля;
- по функции изменения площади опорной поверхности круга по глубине профиля.

В компьютерной модели образ абразивного круга присутствует в трех вариантах:

- исходный вариант (до правки);
- вариант правленого круга с учетом колебаний и упругих деформаций станка;
- вариант правленого круга в условно «абсолютно жесткой» упругой системе.

Наличие указанной информации о ПС круга дает возможность выполнить анализ исправляющей способности процесса правки, под которой понимается степень коррекции рельефа круга за счет процесса правки при различных условиях ее реализации. В этой связи для оценки качества правки и влияния на нее свойств динамической системы станка целесообразно использовать следующие показатели:

- коэффициент исправления рельефа ПС круга по функции распределения вершин абразивных зерен (K_{up});
- коэффициент исправления рельефа ПС круга по функции площади опорной поверхности (K_{un});
- коэффициент исправляющей способности процесса правки (K_u);
- коэффициент динамического влияния системы правки ($K_{дв}$).

Первые два показателя рассчитываются в виде отношений параметра правленого ПС круга к аналогичному параметру до правки. Коэффициент исправляющий способности процесса правки K_u рассчитывается как средняя величина между значениями исправляющих коэффициентов K_{up} и K_{un}. Коэффициент динамического влияния $K_{дв}$ определяет степень влияния динамических свойств системы правки и рассчитывается как отношение коэффициента исправления K_{un} рельефа круга в условно жесткой упругой системе (без колебаний) к аналогичному показателю правленого круга с учетом колебаний динамической системы правки.

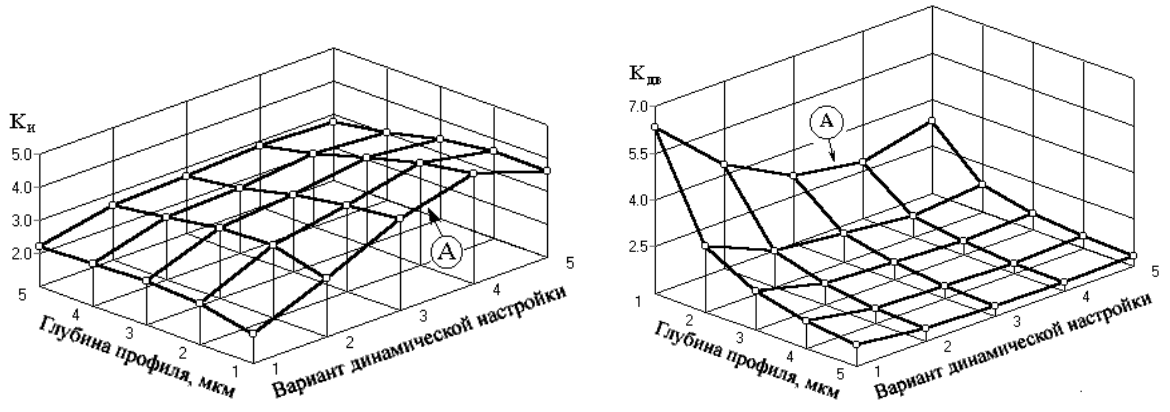
Результаты исследования

Динамические явления при правке являются следствием возбуждения ее динамической системы процессом высокоскоростного хрупкого ударного разрушения фрагментов ПС круга. Каждое соотношение параметров подсистем абразивного круга и правки отражает определенный уровень динамической настройки. В этой связи в основу исследований положен метод варьирования параметрами динамической системы правки путем изменения величины вылета державки, несущей правящий инструмент, что позволяло изменять динамическую настройку, оказывающую влияние на сопровождающий обработку колебательный процесс и, как следствие – на качество правленого абразивного инструмента. Всего использовалось пять вариантов вылета державки, соответствующие пяти вариантам динамической настройки системы правки.

На рис. 2 приведены графики коэффициентов исправляющей способности процесса правки (а) и динамического влияния (б). Наибольшая исправляющая способность

имеет место в условиях правки по четвертому варианту динамической настройки, а наименьшая – по ее первому варианту. Соотношения между коэффициентами исправления по указанным двум вариантам настройки составляют: на глубине 1 мкм – 4,3/1,9; на глубине 3 мкм – 3,6/2,3; на глубине 5 мкм – 2,9/2,2.

График коэффициента динамического влияния (рис. 2,б) отражает связь степени исправления рельефа абразивного круга с динамической настройкой системы правки. Его, так же, можно интерпретировать как влияние колебательного процесса на исправляющую способность процесса правки. Причем, чем выше значение коэффициента $K_{дв}$, тем в большей степени проявляется отрицательное влияние колебаний на качество процесса правки и правленого абразивного круга.



а) б)

Рис. 2. Влияние динамической настройки системы правки на исправляющую способность (а) и на коэффициент динамического влияния (б)

Из анализа графиков на рис. 2 следует, что различие в исправляющей способности процесса правки проявляется в наибольшей степени на поверхности круга (кривые А) и уменьшается при увеличении глубины профиля.

Визуальную картину о влиянии динамических явлений на процесс формообразования ПС круга можно получить из динамических образов, построенных по реализациям колебаний и представленных на рис. 3. Здесь цифрами 1..5 на фигурах обозначены варианты динамической настройки системы правки, а линии на них представляют собой траекторию движения вершины правящего инструмента в поверхностном слое круга.

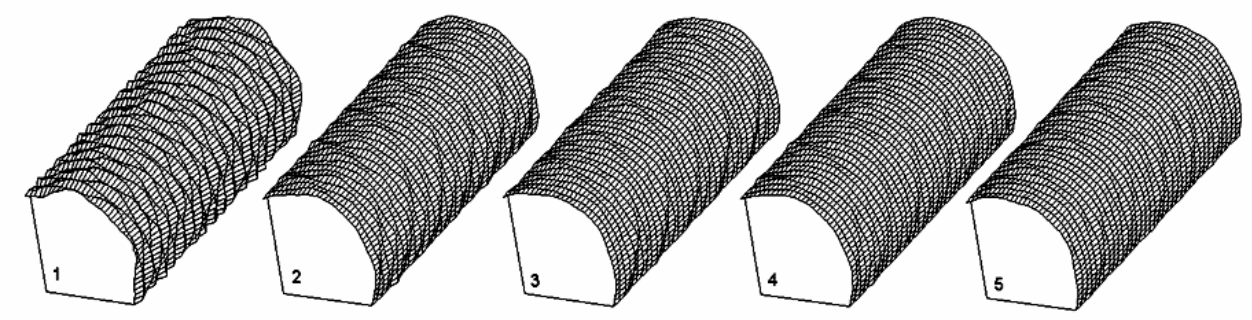


Рис. 3. Динамический образ ПС круга при различных вариантах динамической настройки системы правки

Степень искажения динамического образа от цилиндрической формы и неравномерность шагов сетки в окружном и осевом направлениях отражают уровень относительных колебаний в подсистемах абразивного круга и правки, которые сопровождали процесс обработки. Как видно, наибольшие искажения в формообразование ПС круга вносятся в условиях обработки по первому варианту динамической настройки. Вместе с тем, динамический образ круга, полученный при обработке по четвертому варианту динамической настройки, имеет наименьшие искажения. Степень искажения динамических образов ПС круга за счет изменения динамической настройки хорошо согласуется с полученным на рис. 2,б графиком динамического влияния.

Оценка качества динамической настройки

Подсистемы абразивного круга и правки взаимодействуют между собой через процесс резания, поэтому они являются динамически связанными. Их движения, возмущенные процессом правки, проявляются в виде сочетания различных форм колебаний. Для двух связанных подсистем одного направления взаимовлияние форм колебаний целесообразно оценить векторным параметром $\overline{C} = K_c \cdot \overline{J}_\partial$, где $K_c = \dfrac{\prod_1^n K_i}{\sum_1^n K_i}$ – показатель связанностей парциальных систем по собственным формам колебаний; K_i – коэффициенты взаимных связанностей в подсистемах абразивного круга и правки одного направления; $\overline{J}_\partial = \overline{J}_{\partial 1} + \overline{J}_{\partial 2}$ – сумма векторов динамических податливостей в подсистемах в направлении исследуемой координатной оси; n – число исследуемых форм колебаний.

Модуль динамической податливости подсистемы на частоте возмущения $\omega_в$ определяется суммой собственной j_c и взаимной $j_в$ податливостей:

$$j_c = \frac{m_2\omega_в^2\left(1-\dfrac{\omega_{02}^2}{\omega_в^2}+\dfrac{\delta_2}{\omega_в}\right)}{\Delta(\omega)}, \qquad j_в = \frac{m_2\gamma_1}{\Delta(\omega)}, \tag{3}$$

где $\Delta(\omega) = m_1 m_2 \omega_в^4\left[\left(1-\dfrac{\omega_{01}^2}{\omega_в^2}+\dfrac{\delta_1}{\omega_в}\right)\left(1-\dfrac{\omega_{02}^2}{\omega_в^2}+\dfrac{\delta_2}{\omega_в}\right)-\dfrac{\gamma_1\gamma_2}{\omega_в^4}\right]$ – детерминант подсистемы; ω_{0i} – парциальные частоты; δ_i – коэффициенты диссипации; γ_i – коэффициенты связей подсистем; m_1, m_2 – колебательные массы.

Тогда качество динамической настройки системы правки целесообразно оценить результирующим вектором по трем координатным направлениям

$$\overline{П_{\partial н}} = \sum_1^3 \overline{C}_i \,. \tag{4}$$

Его направление указывает на наиболее «слабый» элемент динамической системы, а модуль является комплексным показателем, характеризующим динамическую податливость и степень связанностей в системе по собственным формам колебаний.

Многочисленными компьютерными исследованиями с широким варьированием динамических параметров подсистем абразивного круга и правки установлено, что модуль вектора, рассчитываемый по выражению (4), имеет достаточно высокую корреля-

цию с качеством правленого ПС круга, что позволяет рекомендовать его в качестве показателя или критерия оптимальной динамической настройки системы правки. При наличии элементов в механизме правки, позволяющих изменять его какие-либо настройки, оптимальным будет тот вариант, который соответствует минимальному значению показателя настройки $П_{дн}$.

Заключение

Компьютерное моделирование динамических явлений, сопровождающих механическую обработку неоднородных материалов на примере процесса правки абразивных кругов, позволило установить следующее:

1. На качество правленого ПС круга оказывает существенное влиянием колебательный процесс, возбуждаемый в результате высокоскоростного ударного взаимодействия фрагментов круга с вершиной правящего инструмента.
2. Параметры колебательного процесса зависят от соотношения динамических параметров подсистем, реализующих процесс правки, что позволяет выйти на их оптимальную динамическую настройку.
3. Для оценки качества динамической настройки разработан комплексный показатель, учитывающий динамические податливости и степень связанности участвующих в резании подсистем.

Список литературы:

1. Бржозовский Б.М. Обеспечение качества обработки на основе оптимальной динамической настройки формообразующих механических подсистем изделия, абразивного и правящего инструментов / Б.М. Бржозовский, И.Н. Янкин. – Саратов: изд-во Сарат. ун-та, 2004. – 116 с.

2. Янкин И.Н. Идентификация колебательного процесса на основе частотных методов / И.Н. Янкин // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 8. – С. 29-31.

Надійшла до редколегії 20.02.2012.

Б.М. Бржозовський, І.Н. Янкин, Д.А. Хайров

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РІЗАННЯ НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ОПТИМАЛЬНОГО ДИНАМІЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ФОРМОТВОРНИХ ПІДСИСТЕМ ВЕРСТАТА

У статті на прикладі процесу правки абразивних кругів приведені результати дослідження динамічних явищ, супроводжуючих обробку неоднорідних матеріалів. На основі комп'ютерної моделі процесу правки показаний вплив співвідношення динамічних параметрів підсистем абразивного круга і правки на якість правленого абразивного інструменту. Запропонований показник оптимального динамічного налаштування системи правки по критерію якості правленого інструменту

Ключові слова: *динамічна система, коливання, якість правки.*

B.M. Brzhozovskiy, I.N. Yankin, D.A. Khayrov

PROVIDING of QUALITY of CUTTING of HETEROGENEOUS MATERIALS ON BASIS of OPTIMUM DYNAMIC TUNING of SHAPE-GENERATING SUBSYSTEMS of MACHINE-TOOL

In the article on the example of process of correction of abrasive circles the results of research of the dynamic phenomena, accompanying treatment of heterogeneous materials are resulted. On the basis of computer model of process of correction influence of correlation of dynamic parameters of subsystems of abrasive circle and correction on quality of pravlenogo abrasive instrument is rotined. The index of the optimum dynamic tuning of the system of correction on the criterion of quality of pravlenogo instrument is offered

Keywords*: dynamic system, vibrations, quality of correction.*