

**Моделирование тангенциальных колебаний комбинированной режущей-деформирующей обработки нежестких валов**

к.т.н. доц. Анкин А.В., Чебышев А.И.  
Университет машиностроения  
8 (495) 223-05-34, [ankin@mami.ru](mailto:ankin@mami.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрены подходы к моделированию технологических процессов и устройств для режущей-деформирующей обработки нежестких валов.

*Ключевые слова:* комбинированная обработка, нежесткий вал, колебания, режущий модуль, крутильные колебания.

В современном машиностроении проблема создания высокоэффективных технологических процессов механической обработки с учетом выполнения требований ресурсосбережения, энергосбережения и экологии является одной из наиболее важных. С увеличением требований к качеству деталей и узлов машин большое значение в технологическом процессе их изготовления приобретают отделочные операции, во многом определяющие уровень эксплуатационных показателей машин.

Одним из путей снижения себестоимости выпускаемой продукции при одновременном обеспечении заданных параметров качества является создание новых и совершенствование известных методов механической обработки. Определенный эффект по снижению себестоимости дают методы комбинированной обработки, основанные на совмещении способов воздействия на обрабатываемый материал резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Применение технологических процессов обработки, базирующихся на использовании комбинированных методов, позволяет повысить точность формы и размеров обрабатываемого нежесткого вала, обеспечить малую величину шероховатости поверхности, улучшить физико-механические свойства поверхностного слоя детали и, как следствие, повысить эксплуатационные показатели детали и узла механизма в целом, достичь высокой производительности обработки и снизить ее себестоимость за счет энерго- и ресурсосбережения, улучшить экологические условия производственного процесса.

В развитии технологии машиностроения значительные трудности вызывали проблемы обработки деталей с низкой жесткостью и высокими требованиями по качеству. Наиболее яркими и распространенными представителями деталей с низкой жесткостью являются валы с отношением длины к диаметру более десяти, с требованиями по точности  $IT\ 7...9$ , по шероховатости поверхности  $Ra < 0,16...0,32$  мкм.

Разработка комбинированных методов обработки в определенной степени позволила приблизиться к решению проблемы качественного и производительного изготовления нежестких валов за счет увеличения концентрации операций и выполнения принципа сохранения технологических баз. Применение технологических процессов комбинированной обработки позволяет также повысить точность формы и размеров обрабатываемого нежесткого вала, обеспечить малую величину шероховатости поверхности, улучшить физико-механические свойства поверхностного слоя детали и, как следствие, повысить эксплуатационные показатели детали и узла механизма в целом.

Однако теоретические основы создания таких технологических процессов недостаточно обобщены и разработаны. Так, мало исследовано влияние целого ряда факторов на процесс формо- и размерообразования, шероховатость поверхности, таких как, например, влияние изменения жесткости по длине обработки, колебательных процессов, взаимодействия частотных характеристик процесса обработки и ряда других.

Существующие конструкции инструментов и устройств для осуществления комбинированной режущей-деформирующей обработки характеризует то, что недостаточная жесткость конструкций узлов и качество сопряжений обуславливает нарушение равновесного состояния системы действующих сил при обработке, что приводит к снижению точности и качества комбинированной режущей-деформирующей обработки.

Проведенные ранее исследования показали [1], что обеспечение точности комбинированной обработки нежестких валов в значительной степени зависит от вида силового состояния технологической системы. На основании этой предпосылки различают следующие виды силового состояния технологических систем:

система действующих сил в технологической системе неустойчива, так называемые разомкнутые системы (рисунок 1);

система действующих сил в технологической системе близка к устойчивой, так называемые системы с дополнительными замкнутыми относительно обрабатываемой детали контурами (рисунок 2).

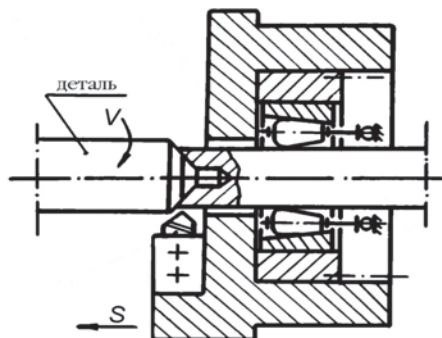


Рисунок 1. Разомкнутая система

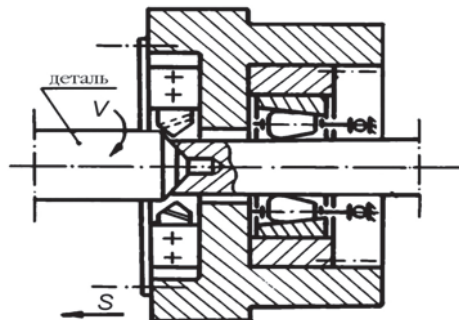


Рисунок 2. Система с замкнутыми контурами

Однако, как показывает проведенный анализ [2], разработанные ранее схемы инструментов для комбинированной обработки не обеспечивают в требуемой мере создание достаточно устойчивого силового состояния, элементы инструмента подвержены нагрузкам, и, как следствие, имеют место их перемещения (рисунок 3), что влечет образование погрешности обработки.

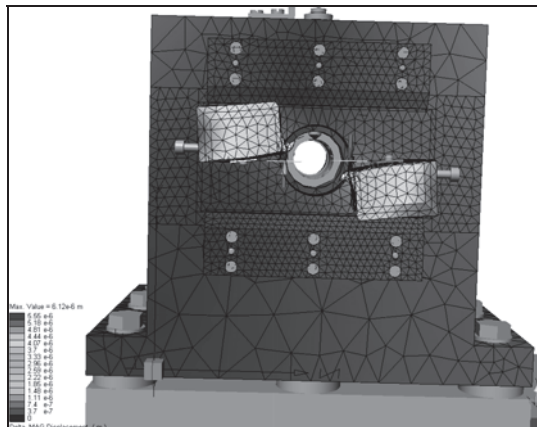


Рисунок 3. Результаты расчета перемещений

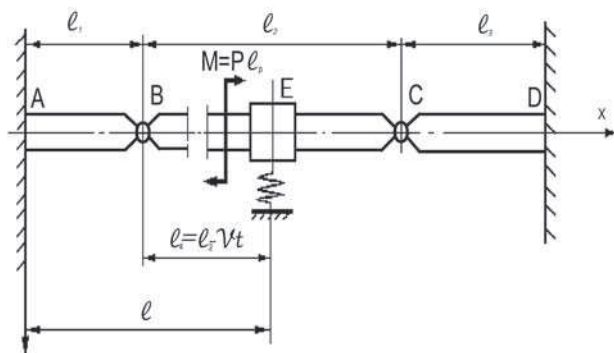


Рисунок 4. Исходная механическая модель

Осуществление процесса обработки с высокой производительностью ведет к возникновению значительных крутильных колебаний нежестких валов, которые на начальном этапе математического моделирования технологической системы (рисунок 4) не были учтены. Сила, действующая на деталь, рассчитывалась по формуле [3, 4], в которой не учтена составляющая погрешности обработки от крутильных колебаний.

$$P(\omega, V, h, \chi_1, \chi_2) \approx P_0 + C\varpi(x, t) + P_1 \cdot \left[ \varpi(x, t) \cos \omega t - a \frac{\varepsilon(x)}{2} \sin^2 \omega t + \Delta(x, t) \right] \quad (1)$$

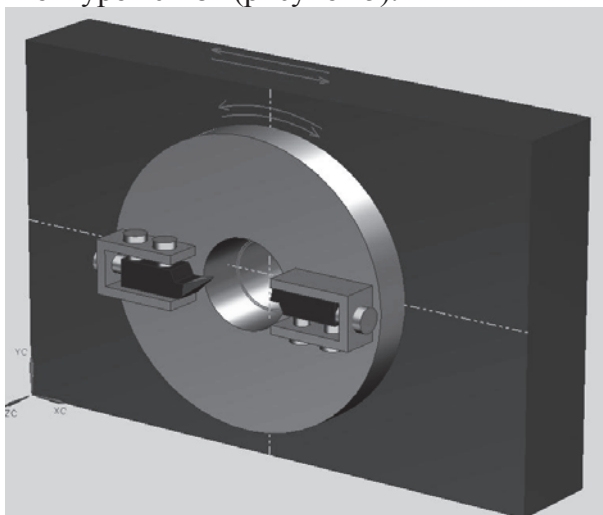
Эти колебания нарушают устойчивое силовое состояние подсистемы деталь-инструмент и являются следствием недостаточной жесткости элементов комбинированных инструментов, отсутствия силовой взаимосвязи между режущими и деформирующими частями последних в начале и конце обработки, колебания жесткости подсистемы деталь-

инструмент по длине обработки, слабой демпфирующей способности.

Крутильные колебания возникают в результате неравномерности периодического момента как движущих сил, так и сил сопротивления. Неравномерность крутящего момента вызывает неравномерность изменения угловой скорости вала, т. е. то ускорение, то замедление вращения. В каждом сечении вала будет своя степень неравномерности вращения, поскольку в одинаковый промежуток времени массы проходят разные углы и, следовательно, движутся с разными скоростями, что создаёт переменное кручение вала и динамические знакопеременные напряжения.

При совпадении частот собственных колебаний системы с частотой периодического крутящего момента движущих сил и сил сопротивления возникают резонансные колебания. В этом случае повышается уровень динамических переменных напряжений. В некоторых случаях возможны совместные колебания с различными видами деформации элементов системы, например изгибно-крутильные колебания.

Одним из путей, способствующих решению указанных проблем, может стать использование концепции дополнительного силового замыкания [5] в процессе обработки данных деталей. В основу указанной концепции положен принцип создания дополнительных замкнутых относительно детали контуров связи (рисунок 5).



**Рисунок 5. «Плавающий» резцовый модуль с дополнительным тангенциальным контуром связи**

Условное отсутствие взаимодействия с другими элементами технологической системы может достигаться путем введения для какого-либо элемента (элементов) дополнительного контура или самого дополнительного контура связи одной или более степеней свободы, снижением на определенную величину его жесткости и т.д. При создании нескольких дополнительных замкнутых относительно детали контуров связи следует учитывать, что контуры могут взаимодействовать между собой, так как обрабатываемая деталь является общим элементом для всех контуров. В результате этого в технологической системе образуется интегральная колебательная система с новыми параметрами. Возможными путями управления параметрами вновь образованной системы являются изменение жесткостных характеристик, соотношения оборотной и изгибной частот колебаний нежесткого вала, придание степени свободы элементу или элементам контуров связи технологической системы и, как следствие, возможность осцилляции в процессе обработки, наложение дополнительных колебаний на элементы контуров связи технологической системы.

Это реализовано в проекте твердотельной модели резцового модуля, в которой в «плавающий» в направлении размерообразования блок установлен задемпфированный пружинами диск с режущими элементами. В этом случае при превышении заданной в расчетной модели нагрузки диск поворачивается относительно оси вращения детали на физически ограниченный угол, тем самым блокируя передачу возможного радиального смещения на «плавающий» блок.

Величина углового смещения определяется по известной формуле  $\varphi = \varphi_0 \cos pt + \frac{\varphi_0^1}{p} \sin pt$ , являющейся общим решением уравнения крутильных колебаний, что учитывается в аргументе  $\omega$  дальнейших расчетов постоянной и переменной составляющей сил резания:

$$P_0 = P(\omega, v, h_0, \chi_1, \chi_2) \quad (2)$$

$$P_1 = \frac{\partial P(\omega, v, h_0, \chi_1, \chi_2)}{\partial \mathfrak{S}} \quad (3)$$

Таким образом, исследование влияния жесткостных и динамических характеристик элементов технологической системы комбинированной обработки позволяет определить пути дальнейшего усовершенствования конструкций инструмента и создания новых методов обработки.

### Литература

1. Максимов Ю.В., Анкин А.В. Образование погрешности при комбинированной обработке нежестких валов. – «Автомобильная промышленность», 1995, № 9, с. 28-31.
2. Анкин А.В. Тангенциальные колебания при совмещении резания и поверхностного пластического деформирования нежестких валов. Реферируемый журнал «Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), Т. 2, 2012, с. 7-10.
3. Анкин А.В., Максимов Ю.В., Матяш В.И. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов. – «Вестник машиностроения», 1997, № 3, с. 27-30.
4. Максимов Ю.В., Логинов Р.В. Моделирование комбинированной обработки нежестких валов. «Химическое и нефтегазовое машиностроение», 1998, № 9-10, с. 61-63.
5. Максимов Ю.В., Анкин А.В. Theory and Practice of Technology for Machining Non-Rigid Smooth Shafts in Reconfigurable Production (Теория и практика обработки нежестких валов в реконфигурируемом производстве) Монография. Reconfigurable Manufacturing systems and transformable Factories. Под ред. А.И. Дашенко. Изд. «Springer-Verlag Berlin Heidelberg», 2006, с. 544-568.

### **Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности**

Бавыкин О.Б., д.т.н. проф. Вячеславова О.Ф.  
Университет машиностроения  
smis@mami.ru

*Аннотация.* В статье проведен анализ результатов исследований взаимосвязи фрактальной размерности поверхности объекта с ее свойствами и его функциональными параметрами. В результате анализа предложена таблица, описывающая характер взаимосвязи.

*Ключевые слова:* фрактальный анализ, фрактальная размерность, свойства поверхности, шероховатость

Изучение взаимосвязи свойств поверхности и ее геометрических характеристик имеет давнюю историю, однако проблемы качества поверхности продолжают существовать и, более того, приобретают особую актуальность в связи с созданием новых технологий обработки материалов.

Они отчетливо проявляются в области нанотехнологий, для которых шероховатость рассматривается не как вторичная характеристика, являющаяся «откликом» структуры поверхностного слоя на воздействие того или иного физического процесса, а как свойство самой структуры.

Кроме того, форма элементов шероховатости, возникающие на поверхности при воздействии на материал концентрированными потоками энергии, как правило, сильно отлича-