

УДК621.941

Г.А. Оборский, д-р техн. наук, А.А. Оргян, д-р техн. наук, Р.М. Минчев,
А.В. Баланюк, Одесса, Украина

ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

У статті розглянуті проблемні завдання технологічної динаміки, як наукового напрямку для вивчення вібростійкості технологічних систем, взаємодії різних коливальних форм з метою підвищення якості обробки різанням. Наведено результати деяких досліджень по вивченню коливань нестационарних динамічних систем під впливом збурень робочих процесів, зокрема, при переривчастому різанні.

Ключові слова: технологічна динаміка, якість обробки різанням

В статье рассмотрены проблемные задачи технологической динамики, как научного направления для изучения виброустойчивости технологических систем, взаимодействия разных колебательных форм с целью повышения качества обработки резанием. Приведены результаты некоторых исследований по изучению колебаний нестационарных динамических систем под воздействием возмущений рабочих процессов, в частности, при прерывистом резании..

Ключевые слова: технологическая динамика, качество обработки резанием

The problem problems of technological dynamics as a scientific direction for the study of vibration resistance of technological systems, interaction of different vibrational forms with the purpose of improving the quality of cutting processing are considered in the article. The results of some studies on the oscillations of nonstationary dynamical systems under the influence of perturbations of working processes, in particular, with intermittent cutting, are presented.

Keywords: technological dynamics, quality of cutting processing

Постоянно возрастающие требования к эксплуатационным качествам машин накладывают всё более жёсткие технические условия на их изготовление. Усложняются не только сами показатели качества, но и возможные их сочетания, носящие подчас противоречивый характер. Традиционные подходы к поиску технологических решений при этом оказываются неперспективными.

Развитие технологии машиностроения, как науки, отражая достижения в области проектирования, изготовления и сборки технологических систем, требует решения ряда задач, связанных с исследованием динамических явлений при механообработке. О важности динамических задач, например, в станкостроении свидетельствует развившееся в последние десятилетия направление динамики станков.

Основным техническим положением динамики станков является представление о замкнутости динамической системы, учитывающее взаимодействие эквивалентной упругой системы станка с рабочими процессами (резанием, трением и др.) [1, 4]. Рассматривая станок, как многоконтурную систему автоматического регулирования, она определяет его динамическое качество на основе ряда установленных критериев: запаса

устойчивости системы, быстродействия, уровня колебаний холостого хода и др. Разрабатывая рекомендации по проектированию станочных систем, динамика станков связана с холодной обработкой металлов, теорией резания, сопротивлением материалов, теорией автоматического регулирования, прикладной теорией колебаний. Непосредственным образом динамика станков связана с технологией машиностроения. Анализируя связь технологии машиностроения с динамикой станков, можно отметить следующее:

1. Объектом исследования в обоих случаях является технологическая система «станок – приспособление – деталь – инструмент», правда, с некоторым различием приоритетов в решениях.

2. Динамическое качество станка является показателем, характеризующим не только вибрационный режим при холостом ходе и при резании, но и качество обработки. Одна из задач технологии машиностроения – проектирование процесса механической обработки, обеспечивающего заданные показатели точности.

3. Технология машиностроения, как и станкостроение, непосредственно связана с теорией резания, теорией упругости и пластичности, холодной обработкой металла, сопротивлением материалов. Основанием для назначения технологического маршрута обработки являются конструктивные и технологические особенности детали. Эти же особенности лежат в основе проектирования станка.

4. Взаимосвязь технологии машиностроения с динамикой станков становится определяющей при финишной прецизионной обработке, особенно в нестандартных условиях (например, тонкое растачивание длинных отверстий с прерывистой поверхностью), при резании с ударом (фрезерование), когда качество детали определяется колебаниями, возникающими при обработке.

Отмечая непосредственную взаимосвязь технологии машиностроения с динамикой станков, а также большой круг технологических задач, определяемых динамикой взаимодействий, с одной стороны, и учитывая широчайший круг проблем, решаемых технологией машиностроения вообще, с другой стороны, целесообразно выделить конкретную часть проблем, относящихся к динамическим задачам технологии машиностроения. Это направление в технологии машиностроения мы назвали *технологической динамикой*. К задачам этого направления следует отнести:

1. Влияние динамических взаимодействий в технологической системе на точность обработки.

2. Выбор рекомендуемых режимов резания на основе минимизации уровня колебаний.

3. Экспериментальное изучение корреляционных связей между уровнем колебаний и параметрами точности обработки, в частности с шероховатостью поверхности, отклонениями от круглости и волнистостью.

4. Разработка модели замкнутой динамической системы, учитывающей не только потенциально неустойчивые формы, но и объёмные упругие и пластические деформации детали, динамические взаимодействия при резании, влияющие на обрабатываемость и геометрическую точность поверхности.

5. Влияние варианта последовательности технологических операций на изменение уровня колебаний и параметров точности детали.

6. Разработка критериев, позволяющих рассчитывать колебания с учётом точности обработки.

7. Влияние условий базирования и закрепления заготовок на колебания и достижимую точность обработки.

8. Взаимное влияние резцов при обработке 2-х и 3-х ступенчатых отверстий резцовыми борштангами.

9. Технология подрезки сплошных и прерывистых торцов методом врезания.

10. Резание по следу.

11. Переменность положения зоны резания.

12. Переменность параметров упруго-диссипативной инерционной системы (УДИС).

13. Динамические эффекты при вращении силы резания.

14. Взаимодействие изгибной и крутильной форм колебаний.

Рассмотрим некоторые результаты исследований, относящихся к задачам технологической динамики.

1. Зависимость интенсивности колебаний от скорости вращения шпинделя (рис. 1) получена для торцевых фрез с $Z = 3$ и 6. Амплитуды поступательных колебаний в общем нарастают с увеличением скорости вращения, однако наблюдается локальное уменьшение при резонансных значениях зубцовой частоты, которым соответствует возрастание амплитуд угловых колебаний. В условиях главного параметрического резонанса (f_z вдвое больше собственной частоты угловых колебаний $f_{кр}$), которые достигаются при $Z = 6$, максимум амплитуды угловых колебаний значительно ниже, чем при $f_z = f_{кр}$ для $Z = 3$.

Отмеченные закономерности подчеркивают необходимость рассмотрения не только параметрической неустойчивости, но и параметрического возбуждения вынужденных колебаний при торцевом фрезеровании.

2. Для исследований колебаний систем с переменными параметрами наиболее удобной представляется операция подрезки свободного торца методом врезания, при которой проще всего определяется динамическая характеристика процесса резания. Экспериментальное определение условий устойчивости при подрезке торца выполнено по схеме (рис. 2): подрезной резец 6 был установлен на вращающейся оправке 7, а обрабатываемая

деталь 5 закреплялась в отверстии приспособления, жесткость которого можно изменять в широких пределах. Выдвижная пластина 1, закрепленная между стойками 2 имела вылет l_{II} от 40 до 200 мм.

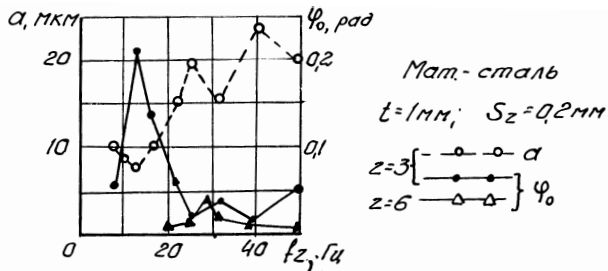


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности колебаний от зубочной частоты

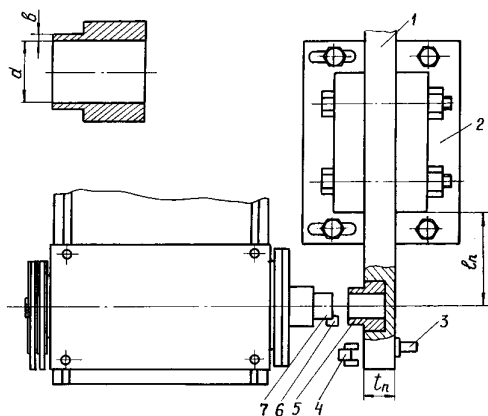


Рисунок 2 – Эксперимент по измерению колебаний при подрезке торца

Колебания в направлении оси обработки измерялись при холостом ходе и при резании индукционным датчиком 3 (или виброметром).

Ряд важных для практической оценки виброустойчивости закономерностей, возникающих из-за переменности параметров, обнаружен в экспериментах на модели и на реальных приспособлениях. При подрезке торцов малого диаметра (около 15 мм) с приближением к границе устойчивости развиваются колебания с частотой, близкой к собственной частоте f_1 упругой системы, причем уровень этих колебаний в пределах одного оборота почти не изменяется, а следы вибраций равномерно распределяются по обработанной поверхности. При обработке в тех же

условиях торцов диаметром 40 мм и более наблюдаются колебания переменного уровня, максимум которого возникает при наибольшем удалении резца от заделки приспособления (рис. 3). На соответствующих участках обработанного торца обнаруживаются и значительно более интенсивные следы вибраций. Кроме того, при обработке торцов большого диаметра развиваются низкочастотные колебания с частотой $f_{\text{вр}}$ вращения шпинделя, размах которых вблизи границы устойчивости не превышает 0,3 мкм.

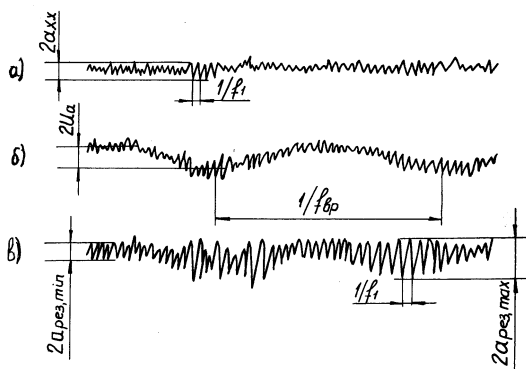


Рисунок 3 – Колебания модели приспособления:

- а – холостой ход;
- б – надежно устойчивое резание;
- в – резание вблизи границы устойчивости

Жесткость приспособлений, измеренная в направлении подачи, (50 - 150 МН/м) в 3 - 4 раза меньше осевой жесткости шпиндельных узлов, применяемых для подрезки торцов, (300 – 500 МН/м), а собственная частота приспособлений примерно вдвое ниже: 100 – 180 Гц по сравнению с 300 – 400 Гц. Декремент колебаний шпиндельных узлов примерно такой же, как у приспособлений, $\delta \approx 0,1 - 0,15$. При таком соотношении параметров подсистем взаимные перемещения детали и инструмента определяются в основном перемещениями подсистемы "деталь – приспособление". Это позволяет применить расчетную схему одномерной УДИС и накладывать ограничения лишь на параметры приспособления.

На рис. 4. представлены предельные значения ширины среза при изменении жесткости приспособления [2].

3. В экспериментах изучалась амплитудная модуляция колебаний.

При обработке материалов резанием часто развиваются колебания, модулированные по амплитуде. Изучение факторов, порождающих такие колебания в станках, представляется важным, поскольку амплитудная

модуляция колебаний непосредственно влияет на точность обработки, а также используется как признак приближения к границе устойчивости динамической системы СПИД при адаптивном управлении процессом обработки.

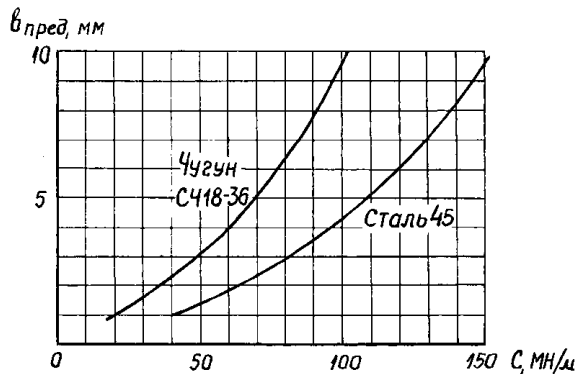


Рисунок 4 – Предельные значения ширины среза при изменении жесткости приспособления

Анализ данных эксперимента на основе зависимостей, определяющих уровень колебаний в замкнутой динамической системе СПИД, позволяет указать ряд причин амплитудной модуляции колебаний:

а) Периодические изменения параметров (жесткости УДИС, ширины среза и др.), влияющие на коэффициенты связанности УДИС с процессом резания. Поскольку амплитуды автоколебаний и вынужденных колебаний зависят от $\Delta\gamma$ (запаса устойчивости системы), вблизи границы устойчивости даже небольшие вариации параметров приводят к значительным изменениям амплитуды колебаний.

б) Колебания скорости вращения, изменяющие условия регенерации следа.

в) Биения, вызванные близостью собственных частот элементов упругой системы (так называемый, "внутренний резонанс").

4. Нестационарность технологической системы часто вызывается переменностью жёсткостью ее элементов.

В проведенных опытах с длинными борштангами овальность эпюры изгибной податливости не приводит к параметрической неустойчивости. Причиной этого является невыполнение условий возбуждения параметрических резонансов при установленных скоростях резания. На рис. 5 прерывистые наклонные прямые – значения собственных частот, при которых возбуждается параметрический резонанс i -го порядка, а диапазон, в котором лежат измеренные собственные частоты борштанг

диаметром 25 мм и длиной 75 – 125 мм, заштрихован. Видно, что резонансы с 1-го по 5-ый не могут возникнуть при скорости резания меньше 400 м/мин.

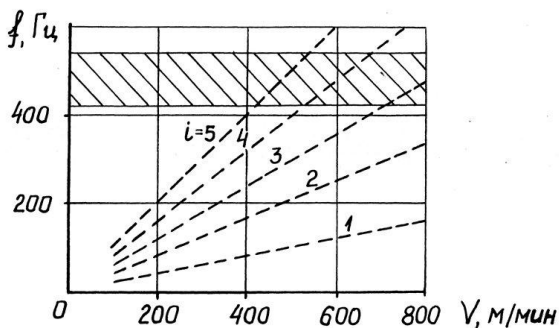


Рисунок 5 – Условие возбуждения параметрических резонансов i -го порядка
 ($d_{\text{борит}} = 25$ мм; $d_{\text{обработ}} = 27$ мм)

5. В экспериментах изучено влияние параметров технологической системы станка и режимов резания на колебания, точность формы продольного и поперечного сечений и шероховатость обработанной поверхности при растачивании ступенчатых отверстий (рис. 6). Отличительной особенностью расчетов технологической динамики при многолезвийной обработке является учет взаимного влияния возмущений, возникающих на каждой из обрабатываемых ступеней отверстия. Сопоставление амплитуд вынужденных колебаний, полученных расчетом и в экспериментах, свидетельствует об удовлетворительном соответствии между ними (наибольшее относительное расхождение между результатами не превышает 20 %).

Эксперименты подтверждают основные выводы расчетов: зависимости амплитуд вынужденных колебаний и отклонений от круглости от соотношения длин ступеней борштанги имеют экстремальный характер при работе наиболее удаленного от фланца резца, а также при работе двух резцов. Изменения коэффициентов влияния, определяющих передачу возмущений от резца к резцу, приводят к тому, что минимальные значения амплитуд колебаний и отклонения от круглости отверстий возникают при некотором соотношении длин ступеней, не соответствующим максимальной жесткости (рис. 6) [3].

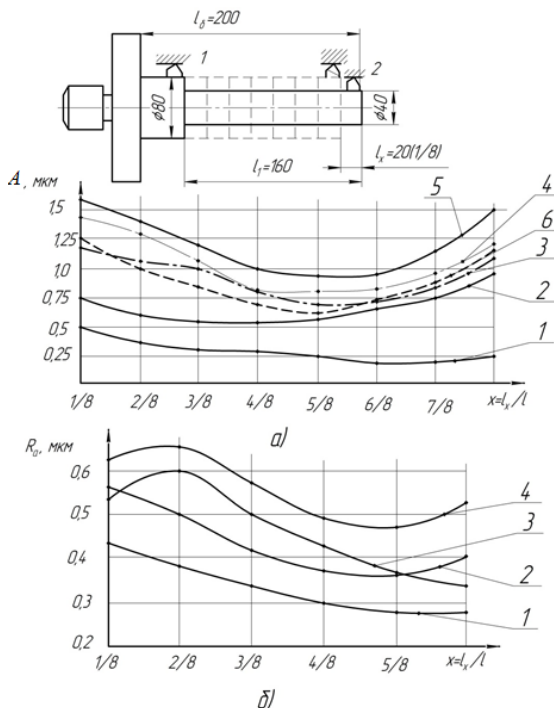


Рисунок 6 – Зависимость амплитуд колебаний у реза и шероховатости поверхности отверстия от соотношения длин ступеней борштанги [3]: сталь 45, $s=0,06 \text{ мм/об}$, $v=160 \text{ м/мин}$ (измерения на $d=40 \text{ мм}$),

при $t=0,1 \text{ мм}$: – а) 1 – работает резец 1; 2 – работает резец 2; 3 и 6 – работают резцы одновременно (3 – эксперимент; 6 – расчет по модели);
при $t=0,3 \text{ мм}$: 4 – работает резец 2; 5 – работают резцы 1 и 2.

б) – 1 – работает резец 1; 2 – работают резцы 1 и 2; при $t=0,3 \text{ мм}$:
3 – работает резец 1; 4 – работают резцы 1 и 2.

6. Сопоставление характеристик виброгасителей различных типов приводит к выводу о том, что наибольшая эффективность достигается при применении многоэлементных ударно-динамических устройств.

7. Разработанная методика расчета погрешностей тонкого растачивания предполагает:

- определение по номограммам частных статических погрешностей вследствие несовпадения оси отверстия в заготовке с осью шпинделя, отклонения от округлости отверстия в заготовке и неравномерной радиальной податливостью у реза по углу поворота шпинделя;

-определение динамических погрешностей по колебаниям, рассчитанным с учетом влияния на параметры динамической системы податливости и инерционных характеристик шпинделя.

Результаты проведенных исследований естественно не исчерпываются содержанием данной статьи, но ее результаты позволяют наметить ряд направлений развития технологической динамики, полезных для технологии машиностроения:

1. Необходимо систематически исследовать нестационарность технологических систем в различных отраслях машиностроения с целью определения типов переменности параметров и пределов их изменений в зависимости от условий обработки.

2. Нужно разработать специальные стенды и аппаратуру, удовлетворяющие требованиям исследований нестационарных систем.

3. Развитие статистической динамики нестационарных систем СПИД и методов прогнозирования точности обработки нужно довести до создания расчетных методов определения технологической надежности.

4. Особое внимание следует обратить на недостаточно изученные проблемы нестационарности систем привода и автоматического управления.

Список используемых источников: 1. *Кудинов В.А.* Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с. 2. *А.А. Оргиян, И.М. Творишук, А.В. Баланюк.* Технологическая динамика подрезки сплошных и прерывистых торцов. "Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. – Вип. 11 / редкол.: В.О.Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – 323 с. – Укр., рос., англ. мовами. С. 264 – 275. 3. *А.А.Оргиян, А.В.Баланюк.* Технологическая динамика тонкого растачивания двухступенчатых отверстий. " Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць[Текст]. – Вип.3(8). – О.: Наука і техніка, 2015. – 320 с. – мов. укр., рос., англ. С. 213 – 223. 4. *Линчевский П.А., Оборский Г.А., Оргиян А.А.* Колебания и точность в технологии машиностроения // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2001. – Вып. 1(13). – С. 14-18.

Bibliography (transliterated): 1. *Kudinov V.A.* Dinamika stankov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 360 s. 2. *A.A. Orgijan, I.M. Tvorishhuk, A.V. Balanjuk.* Tehnologicheskaja dinamika podrezki sploshnyh i preryvistyh torcov. "Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni [Tekst]: zb. nauk. prac'. – Vip. 11 / redkol.: *V.O.Fedorovich* (golova) [ta in.]. – Harkiv – NTU «HPІ», 2016. – 323 s. – Ukr., ros., angl. movami. S. 264-275. 3. *A.A.Orgijan, A.V.Balanjuk.* Tehnologicheskaja dinamika tonkogo rastachivannya dvuhstupenchatyh otverstij. " Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobniectvi: zbirnik naukovih prac'[Tekst]. – Vip.3(8). – O.: Nauka i tehnika, 2015. – 320 s. – mov. ukr.,ros., angl. S. 213-223. 4. *Linchevskij P.A., Oborskij G.A., Orgijan A.A.* Kolebanija i tochnost' v tehnologii mashinostroenija // Tr. Odes. politehn. un-ta. – 2001. – Vyp. 1(13). – S. 14-18.