

УДК 621.91.01

В. Н. ПАВЛЕНКО, Д. Р. СТЕПАНЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ В ТЯЖЕЛОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

*В работе проведен анализ системы станок – приспособление – инструмент – заготовка (СПИЗ) в тяжелом машиностроении. Установлено, что проводятся исследования системы СПИЗ по частям, но это не дает полного понимания процесса резания. Выявлено, что влияние колебаний при резании также изучено слабо и требует комплексного исследования. Приведена классификация по критериям для учета особенностей при резании металлов, которая позволит определить оптимальные сочетания материалов заготовки и режущего инструмента с покрытием. Рассмотрены модели колебаний разных частей системы СПИЗ.*

**Ключевые слова:** резание металлов, тяжелое машиностроение, колебания, период стойкости инструмента, станок – приспособление – инструмент – заготовка.

### Введение

Развитие авиационно-космической техники и машиностроения идет по пути повышения точности изготовления и долговечности оборудования. Так при производстве крупногабаритных деталей важными параметрами является не только качество изделий, но и простой оборудования из-за непредвиденных отказов инструмента и оборудования, связанных с дороговизной наладки или заменой испорченных элементов [1].

Исследованиями процессов резания в легком машиностроении занимается много ученых: И. И. Ильнинский, Г. И. Костюк, В. В. Медисон, П. И. Ящерицин и другие. В большинстве работ указанных авторов процесс резания системы приспособление – инструмент – заготовка (ПИЗ) рассматривается, как снятие определенного слоя металла с заготовки. В результате чего образовывается обработанная поверхность и стружка (рис. 1) [2]. При этом исследованию оборудования и процессам обработки уделено гораздо меньше внимания.

Процесс точения на тяжелых токарных станках сложнее, чем на других. Это связано с огромными габаритами заготовок, так как приходится обрабатывать длинные заготовки очень долго. За это время взаимное положение исполнительных механизмов станка и параметры режима резания и режущего инструмента (РИ) изменяются. Это приводит к колебаниям, параметры которых изменяются за период стойкости РИ, ухудшая при этом качество поверхности.

Особое внимание должно быть уделено системе станок – приспособление – инструмент – заго-

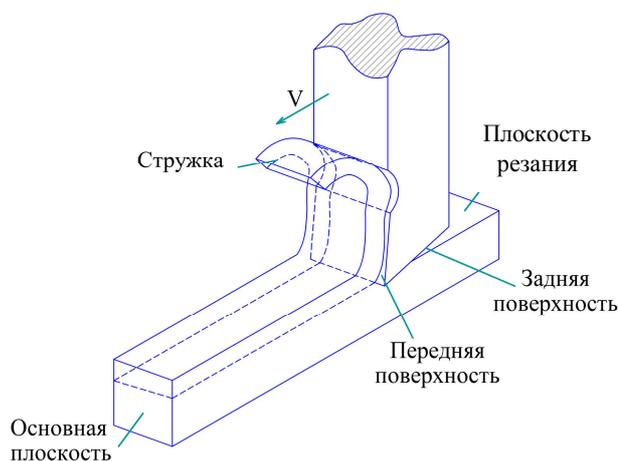


Рис. 1. Схема режущего процесса

товка (СПИЗ), так как на процесс резания влияет много факторов. Таким образом, **целью статьи** является анализ системы СПИЗ при производстве агрегатов ракетно-космической техники.

### Состояние вопроса исследования

Особенности процессов резания в тяжелом машиностроении: большие размеры деталей, массой до 250 тонн, большая глубина резания и подача, дороговизна заготовок, большая длина обрабатываемой поверхности, дорогое уникальное оборудование, неравномерные припуски, сложности влияния на процесс резания, обусловленные эргономическими факторами, повышенная вибрация при резании и другие.

Эти особенности вызывают необходимость ис-

следования закономерностей обработки на тяжелых станках, управления процессами резания, обеспечения точности и работоспособности оборудования, повышения эксплуатационных свойств режущих инструментов, оптимизации хозяйственной деятельности предприятий.

Процесс резания характеризуется стойкостью режущего инструмента. В работе А. Ю. Андропова [1] исследуется стойкость резцов тяжелых токарных станков (обработка деталей массой до 60 т, длиной до 18000 мм, и обработка деталей массой до 25 т, длиной до 8000 мм) из материалов ВК8, Т5К10, ТТ7К12 [1].

Я. В. Васильченко в работе [3] предлагает систему адаптивного управления резанием, представленную на рисунке 2. Исходя из начальных параметров и метода управления регулируемыми параметрами, которые позволяют при наличии первичных параметров и принятого метода обработки, изменяя управляемые параметры, воздействовать на параметры регулирования и добиться получения необходимых технологических параметров.



Рис. 2. Схема регулирования процесса обработки

В работе Ю. О. Стреляна предлагается введение адаптивной системы с обратной связью для получения стабильного качества готовых изделий [4].

В [5] проведены исследования параметров трения при формировании стружки на основе условий резания металлов.

В [6] проведено исследование обработки титанового сплава. Использовались модифицированные модели материалов с прогнозированием силы и температуры. В [7] предлагается использование уравнений Навье-стокса, уравнения преобразования и разрушения материала.

В [8] описывается модель ортогонального резания алюминия. Для описания деформации взята основа отношений напряжений экспоненциального типа. Напряжения сжатия и растяжения при ортогональной обработке были предсказаны с точки зрения масштабирования и распределения.

Однако нет комплексной модели, описывающей поведение режущего инструмента, который работает в условиях тяжелого машиностроения и учитывающий параметры, присущие конструкциям в тяжелом машиностроении [9].

Включение в систему ПИЗ станка ведет к необходимости учета колебаний всех элементов системы.

Проведя обзор источников по исследованию колебаний при резании металла, хочется выделить следующие факторы, влияющие на колебания: влияние жесткости технологической системы станка; влияние механических свойств на колебания; влияние режима резания; влияние геометрии резца.

Определение причин колебаний производится в определенной последовательности. Сначала проверяется жесткость технологической системы станка. Проверяется отсутствие люфтов в направляющих, регулируется натяжение клиньев, прижимных планок, проверяется надежность крепления изделия и инструмента; величины вылетов инструмента, патрона и шпинделя. Если проверка замеченных неисправностей и последующая регулировка не дали результата, проводится дальнейший поиск возможных причин. Проверяются колебания электродвигателя привода, пульсация гидропривода, при шлифовании – биение шлифовального круга и др.

При определении источника вынужденных колебаний детали и узлов они последовательно исключаются из системы [10].

Все факторы, влияющие на процесс резания, приводят к разным видам колебаний. На сегодняшний день принята следующая классификация колебаний:

- вынужденные колебания, которые возникают из-за внешней периодической силы (где частота колебаний = возмущающей силе). Они влияют на прерывистость процесса резания; неравномерность припуска, оставленного на обработку; дисбаланс вращающихся частей станка, детали и инструмента; дефекты зубчатых и ременных передач; от работающих других по близости станков, молотов, прессов;

- параметрические колебания возникают с наличием каких-нибудь переменных параметров. К ним можно отнести: переменную жесткость узла; переменную жесткость детали; шпоночную канавку на валу; переменную жесткость подшипников качения (прогибы вала периодически изменяются, хотя, внешняя сила постоянная). Такие колебания очень близки к вынужденным;

- релаксационные (прерывистые) колебания, возникающие при медленных перемещениях узлов станочной системы;

- автоколебания (самовозбуждающиеся) – возникают из-за: входа или выхода режущих лезвий из контакта с деталью; неравномерность припуска; неоднородность свойств обрабатываемого материала; биение заготовки; биение инструмента (при этом возникают собственные затухающие колебания, при условиях переходящие в незатухающие автоколебания); отставание изменения силы резания от толщины среза (3-5 мкс); изменение силы трения стружки о переднюю поверхность инструмента и обрабатываемую деталь; резание по следу предыдущего вибрационного перехода инструмента вызывает вторичное усиление автоколебаний. Также присущи менее значительные факторы, такие как: изменение рабочих углов инструмента при колебаниях; собственная неустойчивость процесса резания; периодические срывы и скальвания элементов стружки, схватывания и налипания обрабатываемого материала [11].

Как видно из анализа работ [4, 9] устранение вынужденных колебаний не является большой трудностью.

А. И. Каширин и А. П. Соколовский установили, что частота колебаний определяется жесткостью и массой технологической системы станка, а на амплитуду колебаний системы влияет масса и жесткость колебательной системы, вид материала, геометрия инструмента и режимы резания. При изменении условий резания постоянная частота и переменная амплитуда колебаний говорит об автоколебательной природе колебаний [10, 12].

Проведено исследование колебаний детали и инструмента в горизонтальном и вертикальном направлениях и изменение составляющих силы резания по времени И. С. Амосовым [13].

В работе [14] Г. А. Манжос исследовала процесс резания на наличие автоколебаний. Установлено, что они имеют нелинейный характер.

При резании изменение переднего угла возбуждает колебания, вызывая переменную силу, поддерживающую их. Изменение заднего угла изменяет силу трения, что поддерживает колебания в системе СПИЗ. Предполагается, что она возникает немедленно в результате возмущения системы [15, 16].

Колебательные процессы при резании металлов ограничивают параметры режимов резания и как следствие снижают производительность.

Также колебательные процессы при резании металлов создают относительно большие дополнительные динамические нагрузки, причем уменьшают стойкость РИ, влияют на исправную и долговечную работу станка [17].

Среди причин возникновения колебаний выделяют такие как: плохое состояние станка или неправильное закрепление детали и резцов; неблагопри-

ятной геометрией резцов, «корявых» заготовок, а также жесткими параметрами резания. Для большинства случаев разработаны устройства, позволяющие гасить вибрации. Но остаются виды вибраций, которые заслуживают более усиленного изучения для дальнейшего их уменьшения [18].

Компоновка и конструкция станка, а также его масса являются одними из основных демпферов колебательных процессов. Для повышения жесткости, прочности и виброустойчивости применяется литая компоновка станков и основных узлов. Современные технологии предлагают экспериментальное изготовление частей станков из углепластика или полимербетона (гранита). Также к одним из слабых мест станка можно отнести направляющие. Среди направляющих качения и скольжения набирают широкое использование гидростатические, которые обладают следующими преимуществами: хорошая способность к демпфированию; подшипники и направляющие разделены слоем жидкости (масла); превосходная динамическая точность благодаря «усредняющему действию» в гидростатических подшипниках; отсутствие эффекта движения рывками (залипания и проскальзывания stick-slip) из-за незначительной величины вязкого трения.

Современные производители для процесса механической обработки повышают статическую и динамическую жесткость оборудования следующими путями, например, Hembug использует фундамент из природного гранита, гидростатические подшипники, шпинделя и направляющие, изоляцию станка от окружающей среды специальными виброгасящими демпферами.

В станках Monforts применяется раздельная структура. Сварная станина с наклонными направляющими размещена на бетонном основании. Такая конструкция обеспечивает максимальное демпфирование вибраций и необходимую жесткость.

Также проводятся исследования других подсистем станка и их влияние на качество изделия. Например, Ю. М. Данильченко провел исследование шпиндельных узлов. Вынужденные колебания в основном возникают из-за погрешности изготовления дорожек для тел качения. Другие источники либо обладают малым частотным спектром (дисбаланс шпинделя, движением сепаратора, переменная жесткость от действия радиальной силы) либо связанные с нарушением режимов работы. Установлены закономерности для формирования точности быстроходных шпиндельных узлов, предложены диапазоны частот для избегания резонансов на частотах возбуждения подшипников [19].

При чистовом точении изделий на тяжелых станках, формирующих поверхности изделия с высокими параметрами качества, возникает необходи-

мость усиленного контроля получаемой поверхности. Ю. О. Стрелян предлагает методы построения предельных граничных циклов управления операцией чистового точения на тяжелых станках с учетом изменения состояния технологической системы во времени (влияние внешних возмущений, деформации приспособления, детали, инструмента, вибрации в технологической системе...), на основании которых предлагает введение системы с обратной связью для оценки текущего состояния технологической системы. Примененные многоступенчатые циклы повысили точность на один квалитет, и снизили шероховатость в 1,5-2 раза для 15-30% деталей партии [20].

Релаксационные колебания (разрывные) встречаются в цепях подач суппортов, кареток, столов токарных, расточных, фрезерных и других станков, которые также называются «неравномерной подачей» [21].

Созданные системы адаптивного управления, управляют точностью за счет: установки устройств коррекции и выбора зазора; управления температурными деформациями; регулированием жесткости узлов станка в процессе обработки; установления опор с регулируемыми эксплуатационными характеристиками. Также системы замкнутого типа «Системы управления по результатам измерения выходного параметра» позволяют поддерживать выходную величину на заданном уровне независимо от дестабилизирующих факторов [22].

При работе важным параметром является надежность РИ. В [23] предлагается повышение эффективности сборных резцов, математически моделируя прогнозы показателей надежности, что подтверждено испытаниями на ОАО «Новокраматорский машиностроительный завод» на станке мод. КЖ16К275Ф3 [23].

Создание прокатных валков, роторов турбин, колесных пар железнодорожного и горного транспорта, корабельные гребные валы и другое тяжело представить без тяжелых токарных станков. Модернизируя тяжелое машиностроение современными станками, появляется возможность выхода конкурентоспособного оборудования на мировой рынок. Среди созданных станков можно привести разработки Донбасской государственной машиностроительной академии, Национальным техническим университетом «Киевский политехнический институт», Институтом сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля, Национальной академии наук Украины, Институтом проблем материаловедения им. И. М. Францевича, Национальной академии наук Украины, Открытого акционерного общества «Краматорский завод тяжелого машиностроения», моделей КЖ16274Ф3 и КЖ16275Ф3 (рис. 3) по характер-

ристикам, не уступающим аналогам мировых производителей HERKULES (Германия), SKODA (Чехия).



а

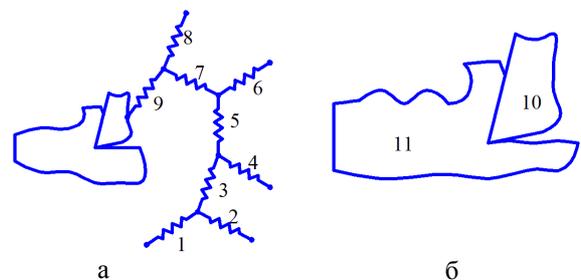


б

Рис. 3. Тяжелые токарные станки с ЧПУ:  
а - мод. КЖ16274Ф3; б - КЖ16275Ф3

За счет установки современных подшипников в упорах передней бабки и вращательном центре задней бабки показатели качества изделия значительно увеличились. В результате модернизации станков продуктивность обработки деталей повысилась на 30%. (радиальное и торцевое биение 0,01 мм, некруглость и нецилиндричность 0,008-0,01 мм, шероховатость Ra 0,8 мкм) [24].

В работе [10] приведена модель легкого металлорежущего станка, РИ и обрабатываемой детали в виде системы с большим числом степеней свободы, схематически в виде системы с большим количеством пружин 1, 2, ..., 9 (рис. 4).



а

б

Рис. 4. Схема вибраций станка:  
а – изменение толщины среза; б – модель упругой системы станка

Сила, возникающая между резцом 10 и заготовкой 11, уравнивается пружинами 1...9, а также их перемещением, направление которого зависит от вибрирующих элементов системы [10].

В работе [16] исследован анализ влияния глубины резания на частоту колебаний при резании металла в системе с одной степенью свободы (рис. 5). Далее рассмотрена замкнутая упругая система станка с учетом степеней свободы резца и заготовки (см. рис. 5), на основании которой подтверждено предположение, что вибрации при резании металла являются автоколебаниями [16].

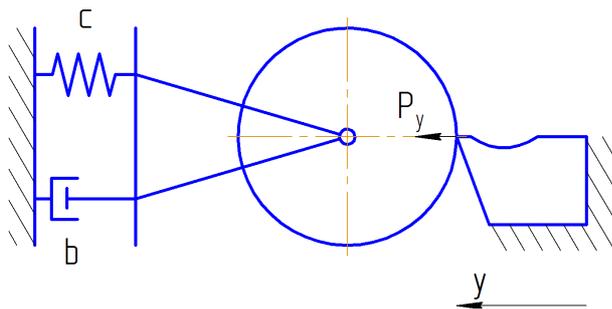


Рис. 5. Схема динамической системы резания с одной степенью свободы в радиальном направлении

В работе [25] отмечается, что основной причиной возникновения автоколебаний при токарной обработке является наличие координатной связи между процессом резания и движением по разным осям упругой системы станка. Предложены основные способы повышения виброустойчивости станков при резании путем ориентации главных осей жесткости и подбор отношений жесткостей и масс элементов системы, обеспечение условий, при которых увеличение силы резания вызывает отжатие инструмента от детали, увеличение демпфирования систем.

Предлагается для рассмотрения система деталь-инструмент, совместно связанная с процессом резания, как единая замкнутая упругая система станка [25].

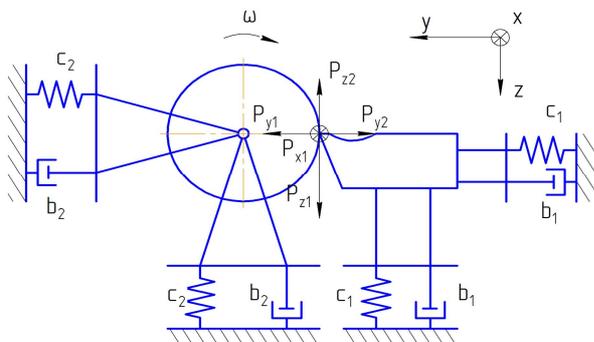


Рис. 6. Упругая система станка, связанная с процессом резания

Изучение влияния колебаний – совокупности динамических процессов при резании металлов – позволит повлиять на точность деталей и на эксплуатационные характеристики станков: производительности, надежности и долговечности. В [26] результаты расчета сравнены с экспериментальными, показано, что динамическая составляющая износа составляет 17-45% от суммарного износа инструмента. При исследовании колебаний при холостом вращении предложены рабочие частоты вращения отличные от резонансных.

В [27] выполнено математическое моделирование с заменой реальной упругой системы на расчетную модель с конечным числом степеней свободы. Создана модель с одной степенью свободы, описывающая холостой ход станка и сам процесс резания с ограничением определения установившихся и вынужденных колебаний; модель с двумя степенями свободы для учета гироскопических сил. Модели подтверждены экспериментами.

В [28] предложен принцип построения модели станка. Математическая модель состоит из двух независимых моделей – эмпирической и теоретической. Также разработана модель главных подсистем привода главного движения станка КА-280. Установлен полный спектр резонансных частот станка. Теоретическая модель учитывает специфические рабочие процессы в отдельных элементах динамической системы с высокой детализацией параметров (электрического двигателя, системы быстроходных валов коробки передач и группы реверса), оценивают влияние каждого на виброакустические характеристики станка.

Выходящие характеристики станка оценивают показателями динамического качества: продуктивность, точность работы, качество обработки деталей, санитарно-гигиенические нормы шума и вибрации [28].

В работе [29] в результате теоретических исследований созданы математические модели упругой системы инструмента для моделирования процессов точения с дроблением стружки в направлении продольной подачи и тангенциальном направлении.

В [30] проведен анализ колебаний копировальных станков на основании гармоничного анализа при холостом ходу и при резании, показывающий относительные колебания резца и поршня, которые зависят от кинематического возбуждения, возникающего при обкатке шупом некруглой поверхности копира и от параметрических возбуждений через прерывистый характер процесса резания. Уравнения движения сложены с учетом форм колебаний узлов станка и с учетом колебаний устройства, подающего в направлении подачи.

В [31] создана модель колебательных процессов в динамических системах заготовок с учетом распределённости массы прутка по длине. Модель включает все схемы консольного и безконсольного упора заготовок и подана в виде бесконечного набора трансформирующих функций, описывающих все формы колебаний заготовки с учетом распределенности параметров. Экспериментальные исследования вибрационного поля выполнены оптическими методами.

В [32] рассмотрено влияние глубины резания на колебания при резании. Представлены уравнения движения с составляющей радиальной силой резания. Рассмотрена глубина резания переменной, а остальные величины постоянными. Выведены уравнения увода колебаний и частота колебаний. Для системы резания составлена система уравнений, описывающая колебания при точении.

И. И. Ильнинский вывел приращение радиальной составляющей силы при резании металла, обусловленные изменением глубины и подачи резания в связи с изменением в процессе колебаний переднего угла. Эта сила поддерживает колебательный процесс. Также И. И. Ильнинский вывел приращение радиальной составляющей, обусловленной сдвигом фаз [33].

В [34] описано устройство, измеряющее параметры, определяющие вибрацию технологической системы в широком диапазоне измерения ее статических и динамических свойств. Исследованы механизмы появления возбуждения регенеративных колебаний при точении и влияние уровня вибраций на качество обработанной поверхности и стойкость РИ.

Вторичное возбуждение автоколебаний связано со срезанием стружки по волнистому следу, что получило название резание по «следу» или резание в условиях регенерации. Автор считает, что применение переменной скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний – сравнительно новая концепция [34].

Авторы работы [35] разработали устройство для исследования автоколебаний при точении, которое позволяет изучить вторичные возбуждения – регенеративный эффект и координатную связь колебаний в различных направлениях резца.

В [36] исследована эффективность влияния демпфирования в упругой системе резец-суппорт на виброустойчивость процесса резания, создан резцедержатель с ориентируемой жесткостью и встроенным демпфером. Рассчитана величина логарифмического декремента колебаний.

В работе [37] представлена модель упругой системы суппортной группы с двумя степенями свободы. В уравнениях учтены линейность характеристик жесткости и пропорциональности сил сопро-

тивления скорости движения системы за нормальными координатами. Приведены рекомендации по модернизации конструкции борштанг для повышения виброустойчивости расточных операций при обработке не жёстким консольным инструментом.

В [38] приведено классическое уравнение движения инструмента и в результате решений создана система уравнений движения резца в процессе вибраций. Составляющие сил записаны как функции, зависящие от условий резания, углов инструмента и условий трения между инструментом и заготовкой.

Одними из требований к оборудованию являются повышение производительности, точности размеров и качество обрабатываемой поверхности деталей машин. Важным является удачное соотношение характеристик заготовок и РИ, а также исследование технологических параметров и технологических возможностей для тяжелых токарных станков, так как они дорогостоящие и эксплуатируются 25-30 лет. В работе [39] проведен анализ времени использования станков, где сказано, что время потерь с организационными неполадками – 23 % и ремонт станка – 24% от времени простоя. Неполадки и ремонт возникают из множества причин. Хочется отметить одну из них – это колебания. Они приводят к ускоренному износу вращающихся узлов и ухудшают качество изделий.

В [40] проведено исследование вибростойкости шпиндельного блока сверлильно-фрезерно-расточного обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4. Для чего была создана модель и разработаны оптимальные режимы резания по критерию виброустойчивости методом одно- и двухпараметрических Д-разбиений. Использовалась среда Matlab для построения частотных характеристик.

В тяжелом машиностроении при обработке уникальных деталей, включающих пазы, выступы, шлицы, режимы обработки несут прерывистый характер, так как при входе инструмента в металл происходит удар. Экспериментально определить характеристики узлов является трудоемкой операцией. В работе [41] выделяется три вида переменного воздействия силы: синусоидально-вибрационные; ступенчатые (силовые); импульсные (ударные), из которых проводились исследования последних, так как синусоидальное воздействие в тяжелых станках пока неприемлемо из-за отсутствия специальных вибраторов, а также их большей стоимости. Авторами проводились исследования импульсного воздействия на планшайбу путем удара (приложенного импульса силы). Выявлены формы колебаний, собственные частоты, амплитуды и их затухание.

В [42] приведен подход путем дифференциального рассмотрения первичной зоны активного пластического деформирования при стружкообразова-

нии, что дает основание рассматривать контактное взаимодействие обработанной поверхности с задней поверхностью РИ и сходящей стружки с передней поверхности инструмента как факторы, определяющие в значительной степени условия формирования и развития автоколебаний. Проведены расчеты в вычислительном комплексе кусочно-линейной аппроксимации системы уравнений для передней и задней поверхности РИ [42].

Обзор литературы позволил определить период стойкости режущего инструмента, объем снимаемого материала за период стойкости и производительность в зависимости от снимаемого слоя.

Эти критерии учитывают характеристики материалов заготовки и режущего инструмента и параметры обработки, данные о которых сведены в таблице 1.

Период стойкости режущего инструмента определяется по формуле:

$$T = m \sqrt{\frac{C_v K_v}{(V t^x S^y)}} \quad (1)$$

где  $C_v$  – коэффициент, зависящий от механических свойств и структуры обрабатываемого материала, материала режущей части резца, а также от условий обработки (для Т15К6 – 292; для ВК8 – 317);

$x, y, m$  – показатели степеней (для Т15К6 – 0,3; 0,15; 0,18 и для ВК8 – 0,15; 0,2; 0,2);

$T$  – стойкость режущего инструмента, мин;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$S$  – подача, мм/об;

$t$  – глубина резания, мм;

$K_v$  – общий поправочный коэффициент (для данного случая равен 1) [43].

Снимаемый объем материала за период стойкости определяется [44]

$$G = V \cdot t \cdot S \cdot T \quad (2)$$

Далее рассмотрим производительность в зависимости от объема снимаемого материала [44].

$$П = \frac{G}{T} \quad (3)$$

В таблице 1 представлены справочные данные из литературы и расчетные данные.

Данные критерии позволят подобрать оптимальные сочетания материалов заготовки и РИ, выделить оптимальные режимы резания с высокими показателями критериев для повышения производительности.

## Заключение

1. Влияние колебаний при резании металлов, особенно в тяжелом машиностроении, изучено слабо и требует дальнейшего изучения. Моделирование колебательных процессов при резании сложная задача. Поэтому комплексное изучение процессов колебания в системе СПИЗ в тяжелом машиностроении является актуальной задачей. Введение критериев позволяет охватить больший спектр особенностей и выбрать рациональные режимы обработки.

2. Моделирование процесса резания металла открывает возможности проверки сочетаний различных значений параметров резания, разновидностей материалов заготовки и РИ, а также учета покрытия РИ. Создание модели системы СПИЗ с учетом параметров, свойственных для тяжелого машиностроения, позволит повысить производительность оборудования и его долговечность. Материалы заготовки и РИ с покрытием выбираются с наивысшим приоритетом, что позволяет снизить затраты на подборке материалов и режимов резания и повысить качество обработки.

Таблица 1

Расчетные данные критериев на основании выбранной проанализированной литературы

Литература	Материал заготовки	Материал РИ	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/мин	$T$ , мин	$G$ мм <sup>3</sup>	$П$ , мм <sup>3</sup> /мин
[31]	сталь 40	Т5К6	1	0,25**	0,9**	45	10125	225
[10]	40Х	Т15К10	5	0,2**	0,8**	45	36000	800
[1]	90ХФ	Т5К10	12	1,6	52	45	44928000	998400
[26]	сталь 45	Т15К6	0,4	0,05	270	55,3*	298656	5400
[29]	сталь 45	Т15К6	0,2	0,16	50	1,65*	2649,8	1600
[36]	сталь 45	Т15К6	1	0,1	80	1,38*	11105,7	8000
[45]	сталь 45	ВК8	0,4**	0,5**	0,7	3,59*	502,68	140
[46]	сталь 45	Т15К6	0,3**	0,17**	100	4879,7*	24886616	5100

\* – расчетные данные;

\*\* – Учитывая опыт работы РИ по соответствующим сталям режимы скорость, подача и глубина резания были выбраны с учетом опыта эксплуатации РИ.

## Литература

1. Андронов, О. Ю. Підвищення надійності збірних твердосплавних різців важких токарних верстатів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Андронов Олексій Юрійович ; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ «КПІ», 2010. – 26 с.
2. Виноградов, Д. В. Новый взгляд на некоторые понятия теории резания [Текст] / Д. В. Виноградов // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2012. – № 9 – С. 1-22.
3. Васильченко, Я. В. Определение рациональных технических параметров новых станков на базе статистических исследований предприятий тяжелого машиностроения [Текст] / Я. В. Васильченко // Вестник НТУ "ХПИ" : сборник научных трудов. – Х. : НТУ ХПИ, 2010. – С. 11 – 18.
4. Стреляная, Ю. О. Построение динамического звена, моделирующего динамику отклонений формы заготовки при чистовом точении на тяжелых токарных станках [Текст] / Ю. О. Стреляная, А. А. Ярошенко // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук. пр. – Вип. 150. – Севастополь, 2014. – С. 153 – 160.
5. Priyadarshini, Amrita. Influence of the Johnson Cook Material Model Parameters and Friction Models on Simulation of Orthogonal cutting process [Text] / Amrita Priyadarshini, Suriya K. Pal, Arun K. Samantaray // Journal of Machining and Forming. – Technologies Indian Institute of Technology, Kharagpur, 2012. – № 4.1/2 – P. 59 – 83.
6. Ozel, Tugurul. Finite element simulation of high speed machining Ti-6Al-4V alloy using modified material models [Text] / Tugurul Ozel and Mohammad Sima // Transactions of NAMRI/SME Manufacturing Automation Research Laboratory Department of Industrial and Systems Engineering. – Rutgers University, 2010. – Volume 38. – P. 49 – 56.
7. Duarte, Fabian. Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for Navier-Stokes equations with moving boundaries [Text] / Fabian Duarte, Raul Gormaz, Srinivasan Natesan // Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. – 2004. – № 193. – P. 4819-4836.
8. Akarca, S. S. A Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) Model for Machining of 1100 Aluminium [Text] / S. S. Akarca, W. J. Altenhof, A. T. Alpas // 10-th International LS-DYNA Users Conference Metal Forming. – Detroit, 2004. – P. 12-1 – 12-8.
9. Литвиненко, К. Способы устранения колебаний станков [Электронный ресурс] / К. Литвиненко // Техсовет. – 2007. – № 8 (50). – Режим доступа: <http://tehsovet.ru/article-2007-8-5-944>. – 30.07.2015.
10. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А. П. Соколовский. – М. : Машигиз, 1955. – 516 с.
11. Яцерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов [Текст] / П. И. Яцерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Мн. : Выш. Шк., 1990. – 512 с.
12. Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металла [Текст] / А. И. Каширин. – М. : Академия наук СССР, 1944. – 131 с.
13. Амосов, И. С. Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов [Текст] / И. С. Амосов. – М. : Машигиз, 1951. – 64 с.
14. Манжос, Г. А. Исследование вибраций в условиях скоростного точения и изыскание методов борьбы с ними [Текст] / Г. А. Манжос. – М. : Машигиз, 1951. – 47 с.
15. Ильницкий, И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения [Текст] / И. И. Ильницкий. – М. : Машигиз, 1958. – 141 с.
16. Паишин, А. В. Разработка комплексной теоретической модели вибрации при точении [Электронный ресурс] / А. В. Паишин. – Режим доступа : <http://masters.donntu.org/2012/fimm/pashinin/diss/index.htm> 8. - 30.12.2015.
17. Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металла [Текст] / А. И. Каширин. – М. : Академия наук СССР, 1944. – 131 с.
18. Вибрации, нарушающие нормальную работу станка [Электронный ресурс] : Промышленный портал Oborudka.ru, сайт. – Режим доступа: <http://www.oborudka.ru/handbook/292.html>. – 30.07.2015.
19. Данильченко, Ю. М. Наукові основи створення швидкохідних прецизійних вузлів металорізальних верстатів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Данильченко Юрій Михайлович ; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ «ХПИ», 2003. – 33 с.
20. Стреляная, Ю. О. Разработка предельных граничных циклов управления операцией чистового точения на тяжелых станках [Текст] / Ю. О. Стреляная, А. А. Ярошенко // Вісник СевНТУ. Серія Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук. пр. – Вип. 140. – Севастополь, 2013. – С. 152 – 157.
21. Гаврилин, А. Н. Надежность и диагностика технологических систем [Текст] : конспект лекций / А. Н. Гаврилин. – АРМ ИК, 2013. – 51 с.
22. Особенности ремонта и модернизации тяжелых станков [Текст] / О. Ф. Бабин, В. Д. Ковалев, И. П. Яцкив, И. С. Коваленко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Вип. 23. – Краматорськ-Київ, 2008. – С. 138 – 141.
23. Клименко, Г. П. Повышение надежности твердосплавных сборных резцов при обработке деталей на тяжелых станках [Текст] / Г. П. Клименко, В. С. Майборода, А. Ю. Андронов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем

: збірник наукових праць. – Вип. 23. – Краматорськ-Київ, 2008. – С. 22 – 27.

24. Створення, освоєння серійного виробництва та впровадження високоєфективних конкурентноспроможних важких токарних верстатів нового покоління [Текст] / В. Д. Ковалев, С. М. Нікогосян, А. Ю. Владимиров, О. Г. Палашек, Г. І. Безкоровайний, В. І. Кориткін, О. І. Волошин, В. М. Волкогон, В. С. Антонюк, Ю. О. Муковоз // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Вип. 24. – Краматорськ, 2009. – С. 3 – 8.

25. Шевченко, О. Методи підвищення стійкості процесу різання при токарній обробці нежорстким інструментальним оснащенням [Текст] / О. Шевченко // Машинознавство. – 2009. – № 8 (146). – С. 16 – 23.

26. Оборський, Г. О. Наукові основи забезпечення параметричної надійності та динамічної якості технологічних систем прицезійної обробки [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Оборський Геннадій Олександрович ; Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – 2006. – 36 с.

27. Арясов, Г. П. Влияние вибраций на точность обрабатываемых деталей при резании [Электронный ресурс] / Г. П. Арясов, Т. А. Паппель, С. Л. Громова. – Режим доступа <http://www.stranniy.ru/health/vliyanie-vibracii-na-tochnost-obrabativaemih-detalej-pri-reza/main.html>. – 08.12.2015.

28. Джаалук, А. Вдосконалення параметрів та математичне моделювання віброакустичних характеристик верстатів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Джаалук Алі ; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ «ХПИ», 2001. – 16 с.

29. Беляєва, А. Ю. Розробка принципів раціонального проектування пружних елементів різцетричачів для точіння з дробленням стружки [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Беляєва Анастасія Юріївна ; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ «ХПИ», 2009. – 22 с.

30. Оргіян, О. А. Прогнозування і забезпечення точності остаточної лезової обробки складно профільних і інших поверхонь обертання (на прикладі комплексної обробки поршнів) [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Оргіян Олександр Андрійович. – Одеський національний політехнічний університет, 2002. – 32 с.

31. Кропівна, А. В. Поліпшення віброакустичних характеристик системи «напрямні труби – шпindelний барабан» багатошпindelних пруткових автоматів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Кропівна Альона Володимирівна ; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ «ХПИ», 2006. – 17 с.

32. Пашинин, А. В. Разработка комплексной теоретической модели вибрации при точении. [Электронный ресурс] / А. В. Пашинин : Портал магистров ДонНТУ, сайт – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2012/fimm/pashinin/diss/index.htm#p0>. – 03.08.2015.

33. Ильницкий, И. И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения [Текст] / И. И. Ильницкий. – М. : МАШГИЗ, 1958 – 144 с.

34. Способ и устройство для исследования регенеративных автоколебаний при точении [Электронный ресурс] / Ю. Н. Внуков, М. В. Кучугуров, С. И. Дядя, Р. Н. Зинченко, Е. А. Гончар // Резание и инструменты в технологических системах. – 2013. – Вип. 83. – С. 42-54. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/rits\\_2013\\_83\\_8.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/rits_2013_83_8.pdf). – 08.09.2015.

35. Устройство для исследования автоколебаний при токарной обработке [Текст] / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, М. В. Кучугуров, Э. В. Кондратюк // Информационные технологии в образовании, науке и производстве. – Вип. 2(7). – Бахва, 2014. – С. 38 – 48.

36. Живолуп, О. О. Эффективный способ повышения вибростойкости пружной системы верстата при токарной обработке [Текст] / О. О. Живолуп, О. В. Шевченко // Процессы механической обработки в машиностроении. – Вип. 11. – Житомир, 2011. – С. 114 – 124.

37. Шевченко, О. В. Повышение вибростойкости процессу розточування при обробці консольним інструментальним оснащенням [Текст] / О. В. Шевченко, А. В. Яшиник // Процессы механической обработки в машиностроении. – Вип. 10. – Житомир, 2011. – С. 354 – 363.

38. Ступницький, В. Математичне моделювання автоколивань різального інструмента і їхній вплив на інженерію поверхні [Текст] / В. Ступницький, Я. Новіцький // Машинознавство. – 2013. – №1-2 (187-188). – С. 19 – 22.

39. Васильченко, Я. В. Исследование технических параметров и технологических возможностей тяжелых токарных станков [Текст] / Я. В. Васильченко, Т. А. Сукова, М. В. Шаповалов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2011. – Вип. №29. – С. 76 – 84.

40. Кроль, О. С. Исследование вибростойкости шпindelного узла и поиск оптимальных режимов резания [Текст] / О. С. Кроль, В. И. Соколов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Вип. №29. – Краматорськ, 2011. – С. 85 – 90.

41. Якимчук, Г. К. Динамика узла планишайба-основание тяжелых карусельных станков при воздействии импульсным методом [Текст] / Г. К. Якимчук, А. А. Пливак // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Вип. №29. – Краматорськ, 2011. – С. 91 – 95.

42. Васильков, Д. В. Динамика технологической системы механической обработки [Текст] /

Д. В. Васильков // *Инструмент и технологии*. – СПб., 2010. – С. 40 – 48.

43. Косилова, А. Г. *Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. [Текст] / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мецеракова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.*

44. Костюк, Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст] : монография-справочник / Г. И. Костюк. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007. – 634 с.*

45. Залога, В. О. *Скінченноеlementна модель процесу різання. Підтвердження її адекватності експерименту [Текст] / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Вип. 5. – Житомир : ЖІТІ, 2007. – С. 60- 72.*

46. *Исследование методом конечных элементов динамики измерения силы резания при врезании [Текст] / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, М. Г. Сторчак, С. С. Емельяненко, С. Н. Селивоненко // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – Суми, 2008. – № 3. – С. 13 – 24.*

*Поступила в редакцію 2.02.2016, рассмотрена на редколлегии 15.02.2016*

### ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ, ПРОТІКАЮЧИХ ПРИ РІЗАННІ МЕТАЛУ В ВАЖКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

*В. М. Павленко, Д. Р. Степаненко*

В роботі проведено аналіз системи станок-приспособування-інструмент-заготівка (СПІЗ) в важкому машинобудуванні. Встановлено, що проводяться дослідження системи СПІЗ по частинам, але це не дає повного розуміння процесу різання. Виявлено, що вплив коливань при різанні також вивчено слабо і потребує комплексного дослідження. Приведено класифікацію по критеріям для врахування особливостей при різанні металів, яка дозволяє виявити оптимальні поєднання матеріалів заготівки і ріжучого інструменту з покриттям. Розглянуто моделі коливань різних частин системи СПІЗ.

**Ключові слова:** різання металів, важке машинобудування, коливання, період стійкості інструмента, станок-приспособування-інструмент-заготівка.

### FEATURES OF PROCESS TAKING PLACE IN CUTTING OF METAL IN HEAVY ENGINEERING

*V. N. Pavlenko, D. R. Stepanenko*

In this article the analysis of the system «machine tool-appliance-tool-part (MATP) in heavy engineering has been conducted out. It was found that studies of MATP in parts are carried on, but they do not provide a complete understanding of the cutting process. It was found that the effect of vibrations during cutting is poorly studied and requires complex studying. The classification according to the criteria for the accounting features in metal cutting, which will determine the optimal mix of workpiece materials and cutting tools coated. Models of vibrations of different parts of MATP have been studied.

**Key words:** metal cutting, heavy engineering, vibrations, tool life, machine tool – appliance – tool – part.

**Павленко Віталій Николаевич** – д-р техн. наук, проф., проректор по науч.-пед. работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Степаненко Денис Романович** – аспирант каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: denstep@ukr.net.