

УДК 621.787

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕЖЕСТКИХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Калафатова Л.П., Олейник С.Ю.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина; ДГМА, г. Краматорск, Украина)

Проблема борьбы с вибрациями при механической обработке имеет большое значение в металлообрабатывающей промышленности. Вибрации являются фактором, ограничивающим производственные возможности станка и режущую способность инструмента. Кроме того, они в ряде случаев отрицательно сказываются на качестве обработанной поверхности деталей.

По результатам исследований, приведенным в [1], можно судить, что вибрации при механической обработке металлов зависят не только от процесса резания, но и от структуры самой колебательной системы, что особенно актуально при обработке конструктивно сложных изделий типа корпусов. Известно [2], что в состав технологической системы при механической обработке входят такие элементы как станок, приспособление, инструмент и деталь (система СПИД). Жесткость технологической системы зависит от большого числа параметров. Однако основное влияние на процесс резания оказывают относительные колебания двух ее компонентов или подсистем – подсистем инструмента и заготовки, которые имеют свои особенности, в частности, различные массы, силы сопротивления и собственные частоты колебаний. При колебательном процессе эти две упругие подсистемы связаны между собой переменной силой резания и лишь одна из них находится в состоянии автоколебательного движения. Вторая же подсистема, называемая присоединенной, находится в состоянии вынужденных колебаний, то есть ее движения полностью управляются силами, передающимися от основной автоколебательной подсистемы, и она полностью подчиняется законам вынужденного колебательного движения [1]. В большинстве случаев механической обработки одну из этих подсистем можно считать доминирующей. При обработке нежестких корпусных деталей доминирующей подсистемой является подсистема детали.

Одними из основных направлений в области исследования колебаний технологических систем являются [1]:

– исследование свойств систем (жесткости, расположения осей жесткости, величины колеблющихся масс) и их влияния на виброустойчивость с целью разработки методов расчета, средств и способов повышения виброустойчивости технологических систем в целом;

– исследование потенциально-колебательных систем при обработке металлов резанием и математическое описание движения таких систем с целью получения тех или иных расчетных зависимостей, графических или табличных данных, определяющих условия устойчивости заданного рабочего движения.

Представленная работа посвящена установлению влияния конструктивных особенностей корпусных деталей на их виброустойчивость при механической обработке. Решить эту задачу можно двумя путями, один из которых – экспериментальные исследования при обработке конкретных корпусных конструкций на производстве, что долго, дорого, не позволяет обобщить и использовать полученные результаты для прогнозирования эффективности обработки корпусных деталей других

конструкций и выдать широкие рекомендации. Поэтому необходима разработка математического аппарата, позволяющего описать процесс обработки с учетом особенностей конструкции детали и определить её поведение (виброустойчивость) в процессе резания.

Целью работы является определение влияния геометрии и расположения элементов конструкции корпусных деталей на их виброустойчивость в процессе механической обработки. Полученные результаты помогут выявить элементы конструкции, которые снижают динамическую жесткость системы и интенсифицируют появление автоколебаний в процессе резания, что весьма актуально для принятия правильных конструкторских решений на этапе проектирования изделий.

При проектировании любой детали конструктор выполняет проектировочные и проверочные расчеты по требуемому количеству параметров, в числе которых зачастую имеется параметр жесткости, виброустойчивости детали. Одним из основных критериев работоспособности механизма является жесткость, которую необходимо обеспечить для правильной работы машины и виброустойчивости системы в целом. Однако зачастую при расчете детали ориентируются на условия ее работы в составе сборочной единицы, при этом не учитывается ее поведение при механической обработке. Для повышения жесткости детали конструктором предусматриваются различные ребра, утолщения стенки, двойные стенки и т.п. При механической обработке детали мы сталкиваемся с системой, отличающейся от системы, рассматриваемой конструктором, а именно с технологической системой СПИД, которая во время процесса механической обработки представляет собой замкнутую динамическую систему. Каждый элемент этой системы во время механической обработки включается в замкнутую цепь воздействия элементов друг на друга, что вызывает автоколебательные процессы [3].

Одной из существенных причин автоколебаний нежестких деталей является периодическое изменение жесткостей относительно неподвижных осей детали, элементов приспособления, деталей и узлов станка [3]. При механической обработке деталь подвергается различным видам переменных нагрузок, которые на ее нежестких участках являются источником деформаций и вибраций. В инженерной механике существует понятие динамической и статической жесткости. Статическая жесткость в данной работе не рассматривается, а под динамической жесткостью $J_{дин}$ понимают [4] отношение гармонической составляющей силы резания $P_{yk} \cos k\omega t$ к вызываемому ею смещению $y(P_{k,n})$

$$J_{дин} = \frac{P_{yk} \cos k\omega t}{y(P_{k,n})}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость, частота гармонической составляющей усилия резания при $k = 1$, вызванная изменением усилия из-за смещения обрабатываемого профиля;

t – время.

Неотъемлемой частью технологического процесса обработки рассматриваемого типа деталей является операция фрезерования. Фрезерованием в корпусах обрабатываются различные плоскости, уступы, пазы. Процесс фрезерования отличается повышенной динамической неустойчивостью в сравнении с другими методами обработки поверхностей. При фрезеровании каждый зуб фрезы за один ее оборот находится в контакте с обрабатываемым материалом относительно малое время. Большую часть оборота он проходит по воздуху, не производя процесса резания. Для

продолжения процесса стружкообразования вдоль всей длины заготовки зуб должен неоднократно врезаться в удаляемый слой материала, что сопровождается ударом материала о его режущую кромку [5].

Периодичность работы зубьев фрезы, переменная толщина и ширина среза (а, следовательно, и переменная площадь поперечного сечения среза), а также непостоянное число зубьев, одновременно находящихся в работе, вызывают переменное значение сил, моментов и мощности, необходимых для осуществления процесса стружкообразования. Все это усложняет процесс фрезерования по сравнению со всеми другими методами обработки металлов резанием [6].

Учитывая сказанное, рассмотрим влияние элементов конструкций нежестких корпусных деталей на динамическую жесткость в процессе резания на примере обработки элемента корпусной детали (уступа) концевой фрезой с учетом условия (1).

Так как расчет динамических характеристик детали как единого целого достаточно трудоемок, то для выявления закономерностей и связей между геометрией детали и её виброустойчивостью представляется целесообразным разбить ее поверхность на отдельные части. Рассмотрим фрагмент корпусной детали при обработке одной из ее сторон на вертикально-фрезерном станке концевой фрезой с винтовым зубом диаметром $D_\phi = 25$ мм, имеющей напайные пластинки из твердого сплава Т15К6. Число зубьев фрезы $z = 4$, угол наклона зуба $\omega = 36^\circ$. Обработываемый материал – конструкционная сталь. Схема обработки представлена на рис. 1.

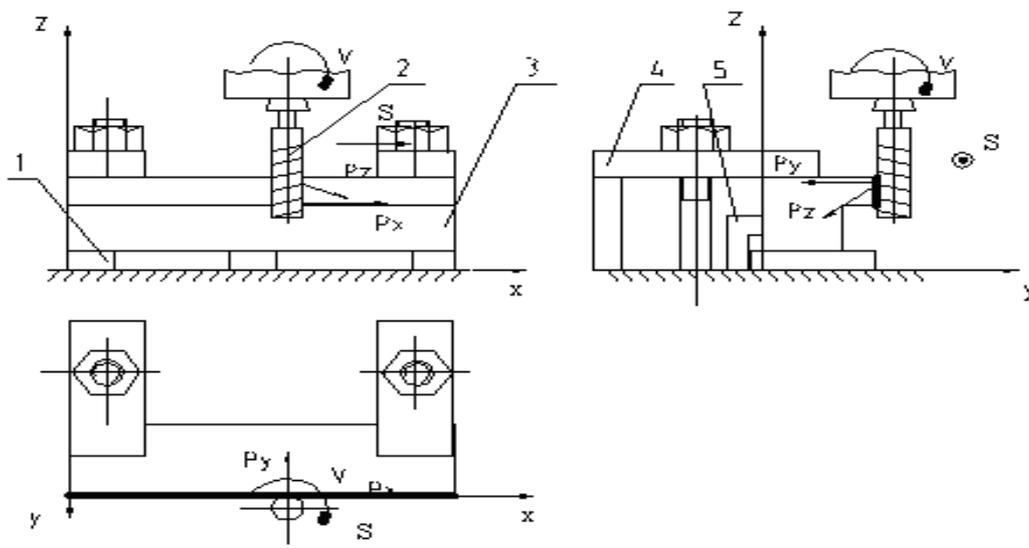


Рис. 1. Схема фрезерования уступа корпуса концевой фрезой

Обозначения, принятые на рисунке: 1 – опора; 2 – концевая фреза; 3 – обрабатываемый элемент детали; 4 – прихват; 5 – упор; P_z , P_y , P_x – составляющие силы резания (соответственно, тангенциальная, радиальная и сила в направлении подачи), возникающие при механической обработке детали; s_z – подача на зуб (0,1 мм/зуб), v – скорость резания (90 м/мин), t – глубина резания (5 мм). Рассматриваемая деталь имеет следующие параметры: длина всей детали и уступа – 135 мм; высота – 40 мм, толщина уступа 15 мм; ширина детали – 30 мм при ширине уступа – 20 мм.

Учет динамической характеристики процесса резания и трения значительно усложняет аналитический анализ устойчивости системы, так как нахождение этой

характеристики в общем случае очень сложно. Математически она может быть описана при совместном решении уравнений упругости, пластичности, теплопередачи и уравнений, описывающих механические свойства материала в зависимости от его напряженного, теплового и деформационного состояний. Эти уравнения будут содержать «инерционные» члены, а также члены, учитывающие различного рода «вязкие» сопротивления, а также члены, учитывающие «силы упругости» [3]. На рис. 2 представлена динамическая модель подсистемы детали.

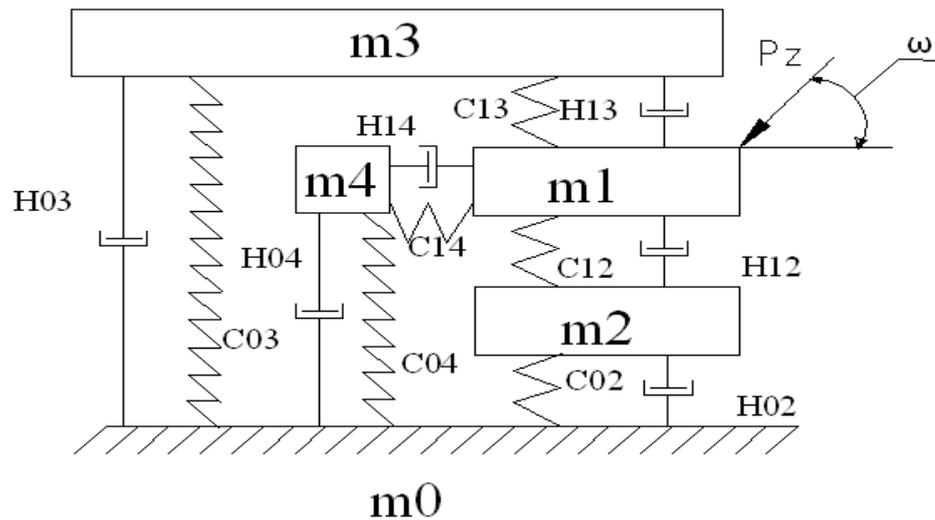


Рис. 2. Динамическая модель подсистемы заготовки для процесса фрезерования

В динамической модели использованы следующие обозначения: m – масса элемента динамической системы ($m1$ – деталь, $m2$ – опора, $m3$ – прихват, $m4$ – упор, $m0$ – стол станка) – инерционный элемент; H – коэффициент диссипации между элементами динамической системы – диссипативный элемент; C – коэффициент жесткости между элементами динамической системы – восстанавливающий элемент; ω – угол наклона зуба концевой фрезы.

Упругие свойства сложных элементов технологических систем, состоящих из нескольких деталей (зачастую сложной конструкции), обычно невозможно определить одним коэффициентом жесткости, так как зависимость между силой и отжатием (её называют упругой характеристикой) нелинейная [7].

Для рассматриваемой модели динамическая жесткость подсистемы заготовки определяется жесткостью отдельных элементов системы, опосредованно выражаемой следующими коэффициентами (см. рис. 2): $C12$, $C13$, $C14$, которые не являются постоянными, а изменяются в зависимости от формы, геометрии, размеров обрабатываемого элемента конструкции детали, от его пространственного расположения, в частности, от элементов базирования.

В исследованиях, результаты которых представлены в источниках [6, 7], эти коэффициенты используются в исследованиях и при расчетах как постоянные, в связи с чем не рассматривается возможность прогнозирования и расчета автоколебаний геометрически сложных корпусных деталей в процессе обработки. Изменение динамической жесткости детали в процессе обработки, в частности, вызванное переменной толщиной среза при фрезеровании винтозубой фрезой [9] приводит к

неустойчивости всей технологической системы, а, следовательно, появлению колебательных процессов, отрицательно влияющих на точность и качество обработки.

На рис. 3 представлена схема элементов резания при обработке концевой винтозубой фрезой (при фрезеровании уступа корпуса концевая фреза работает как цилиндрическая).

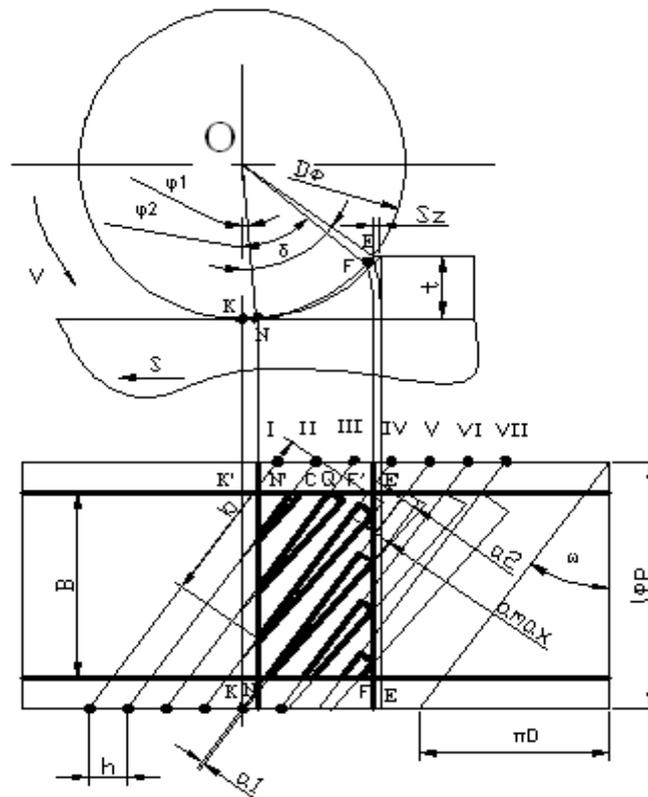


Рис. 3. Элементы резания при работе концевой фрезой [5] (обработка уступа корпуса)

Обозначения, принятые на рис. 3: B – ширина резания, соответствующая толщине обрабатываемого уступа и равная 15 мм; $l_{\phi p}$ – длина режущей части фрезы, равная 20 мм; h – шаг между двумя мгновенными положениями зуба, непостоянный и определяемый геометрически из рис. 3; a_1 , a_2 – соответственно максимальная и минимальная толщина стружки (толщина среза); b – ширина стружки; ψ_1 , ψ_2 – соответственно, углы входа и выхода зуба фрезы; δ – угол контакта фрезы – центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения фрезы с заготовкой, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы.

Для концевой фрезы, с учетом винтового зуба, толщина среза a будет переменной как вдоль всей длины дуги контакта, так и вдоль всей длины активной части зуба. Максимальная толщина среза определяется зависимостью [5]

$$a_{\max} = s_z \sin \delta . \quad (2)$$

Угол δ находится из уравнения $\cos \delta = 1 - \frac{2t}{D_{\phi}}$ и для заданных условий $\delta = 53^\circ$.

Зуб концевой винтозубой фрезы входит в заготовку постепенно и достигает максимального соприкосновения с ней, когда он перекрывает всю её ширину B , затем

постепенно выходит из неё. Мгновенное положение зуба в этом случае характеризуется двумя углами: углом входа ψ_1 и углом выхода ψ_2 (см. рис. 3).

Эти углы определяются по формулам [5]

$$\psi_1 = \frac{360^\circ}{\pi D_\phi} \bar{L}_1 \quad \text{и} \quad \psi_2 = \frac{360^\circ}{\pi D_\phi} \bar{L}_2, \quad (3)$$

где \bar{L}_1 и \bar{L}_2 – мгновенные дуги контакта зуба фрезы, определяющие соответственно углы ее входа и выхода.

Длины дуг для каждого положения зуба относительно заготовки определяются графически из рис. 3, выполненного в реальном масштабе.

Толщины среза для каждого положения (см. рис. 3) на входе a_1 и на выходе a_2 определяются как

$$a_1 = s_z \sin \psi_1 \quad \text{и} \quad a_2 = s_z \sin \psi_2. \quad (4)$$

Для концевой фрезы с винтовым зубом ширина среза для каждого зуба переменна и определяется зависимостью

$$b = \frac{\pi D_\phi}{360^\circ \sin \omega} (\psi_2 - \psi_1). \quad (5)$$

Состояние динамической подсистемы заготовки в значительной степени определяется величиной сил резания P_y и P_z . На данном этапе исследований рассмотрим их совокупное влияние на состояние системы, выраженное составляющей силы резания P_{yz} , меняющейся по мере врезания зуба в заготовку. Эта сила может быть найдена как геометрическая сумма радиальной и тангенциальной составляющих силы резания $P_{yz} = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$.

В свою очередь значения тангенциальной составляющей силы резания для мгновенных положений зуба можно найти из зависимости [10]

$$P_{z_i} = \frac{10 C_p t^x a_i^y b_i^u}{D_\phi^q n^w} K_p \cos \omega, \quad (6)$$

где C_p , K_p и x , y , u , q , w – соответственно постоянные коэффициенты и показатели степени, определяющие условия конкретного процесса фрезерования;

a_i и b_i – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя для мгновенных положений зуба фрезы;

n – частота вращения фрезы.

Радиальную составляющую силы резания, согласно рекомендациям [10], определим из соотношения $P_{y_i} = 0,5 P_{z_i}$. Максимальной сила резания для каждого мгновенного положения зуба будет на выходе фрезы, ею и воспользуемся для дальнейших расчетов. В таблице 1 представлены результаты расчета мгновенных значений усилий резания, полученные в соответствии с условиями фрезерования, предусмотренными рис. 3.

В процессе обработки под действием переменной силы резания происходит деформирование заготовки, величина которого влияет на динамическую жесткость системы. Прогиб уступа детали в точке K (y_k), возникающий в процессе фрезерования, определяем как результат решения дифференциального уравнения упругой линии [11]:

$$EJy'' = M(x), \quad (7)$$

где E – модуль упругости обрабатываемого материала;

J – момент инерции детали относительно оси, проходящей через центр тяжести;

$M(x)$ – момент в опорах А и В.

Таблица 1. Результаты расчета значений силы резания для мгновенных положений зуба фрезы

Значения элементов резания	Номер положения зуба						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Углы мгновенного положения зуба фрезы, град:							
входа ψ_1	0	0	0	5,5	9,58	23,42	32,06
выхода ψ_2	0	17,5	30,8	44,18	46,25	46,25	46,25
Толщины среза, мм:							
на входе a_1	0	0	0	0,009	0,17	0,04	0,057
на выходе a_2	0	0,03	0,051	0,07	0,072	0,072	0,72
Ширина стружки b , мм	0	4,42	9,39	14,35	13,6	8,47	4,15
Сила резания на выходе фрезы P_{yz_i} , Н	0	36,9	117,4	226,2	220,3	137,1	67,2

Для рассматриваемого случая решение уравнения (7) выглядит следующим образом:

$$y_k = \frac{P_{yz} \cdot a^2 \cdot b^2}{3EIL}, \quad (8)$$

где a и b – длины участков, на которые делит уступ корпуса (балку) место приложения силы фрезерования, т.е. положение точки K ;

L – длина фрезеруемого уступа.

Расчет величины прогиба в точке K при перемещении инструмента по пути фрезерования представим в виде графика, приведенного на рис. 4. Расчет осуществлен с помощью прикладной программы Excel. Как следует из графика, деформация уступа при перемещении фрезы в процессе обработки меняется, что свидетельствует об изменении динамической жесткости детали в процессе обработки уступа по его длине. Максимальный прогиб, при заданном базировании и закреплении детали, наблюдается посередине уступа. Одним из наиболее влияющих факторов, изменяющих динамическую жесткость, являются геометрические параметры детали: соотношение ее

габаритных размеров, расположение, конфигурация и размеры конструктивных элементов (в конкретном случае – длина, толщина, высота уступа).



Рис. 4. Схема образования прогибов детали по пути фрезерования при обработке уступа (балки) концевой фрезой с учетом колебаний силы резания

При фрезеровании силы резания непостоянны и изменяются через период времени, равный времени работы зуба от момента его врезания в обрабатываемый материал до момента выхода. Проведя оценку уровня динамической нежесткости, влияющей на уровень вибраций при механической обработке, в случае если величина появляющихся колебаний выходит за рамки, гарантирующие точность и заданную производительность обработки, появляется возможность управлять колебательным процессом при резании. Это возможно за счет выбора наиболее рациональных вариантов базирования и закрепления детали, режимов резания, характеристик фрезы (ее длины, диаметра, числа зубьев) и других дополнительных приемов, повышающих динамическую жесткость системы.

Выводы. Проработка конструкции детали с учетом переменных динамических факторов, систематически возникающих при резании, позволяет повысить эффективность технологического процесса механической обработки.

Разработка математических моделей, используемых для определения параметров колебательных процессов, протекающих в нежестких корпусных деталях при механической обработке, с учетом непостоянства их динамической жесткости позволит с большей точностью выявить факторы, интенсифицирующие колебательный процесс. Использование при создании математической модели конкретной колебательной системы принципа переменности динамических коэффициентов жесткости ее отдельных элементов аналогично схеме, представленной на рис. 2, позволит определить влияние конструктивных параметров обрабатываемой заготовки на интенсивность автоколебаний. За счет этого появляется возможность управления колебательным процессом в подсистеме заготовки во время механической обработки.

Список литературы: 1. Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов/ Под редакцией В.И. Дикушина В.И., Д.И. Решетова. - М.: МАШГИЗ, 1958. – 325 с. 2. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения /В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с. 3. Никитин Б.В. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 275 с. 4. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки и припуски в машиностроении: Справочник технолога. – М.: Машиностроение, 1976. – 420 с. 5. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1964. – 394 с. 6. Тлустый Иржи. Автоколебания в металлорежущих станках. – М.: МАШГИЗ, 1956. – 245 с. 7. Вибрации в технике. Справочник. В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем/ Под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 376 с. 8. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливань і стійкості руху: Підручник. – К.: Вища шк., 2004. – 435 с. 9. Справочник инструментальщика/ Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 435 с. 10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 11. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 676 с.

**ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НЕЖОРСТКИХ КОРПУСНИХ
ДЕТАЛЕЙ НА ЗМІНУ ЇХ ДИНАМІЧНОЇ ЖОРСТКОСТІ
ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

Калафатова Л.П., Олійник С.Ю.

Досліджено вплив геометричних параметрів конструктивних елементів нежорстких корпусних деталей на зміну їх динамічної жорсткості при механічній обробці. Наведені результати моделювання процесу фрезерування уступу корпуса кінцевою фрезею з гвинтовим зубом.

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕЖЕСТКИХ КОРПУСНЫХ
ДЕТАЛЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Калафатова Л.П., Олейник С.Ю.

Исследовано влияние геометрических параметров конструктивных элементов нежестких корпусных деталей на изменение их динамической жесткости при механической обработке. Приведены результаты моделирования процесса фрезерования уступа корпуса концевой фрезой с винтовым зубом.

**INFLUENCE OF DESIGN FEATURES OF NONRIGID CASE DETAILS
ON CHANGE OF THEIR DYNAMIC RIGIDITY AT MACHINING**

Kalafatova L.P., Olejnik S.J.

Influence of geometrical parameters of constructive elements of nonrigid case details on change of their dynamic rigidity at machining is researched. Results of modeling of milling process of the case's ledge by the end-mill with a screw tooth are presented.

Рецензент: к.т.н., доц. Гусев В.В.