

Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей

Е.Ю. Матасова¹, Д.В. Виноградов²

¹ ООО «Декор Инжиниринг»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Feed adjustment when milling curved surfaces

E.Y. Matasova¹, D.V. Vinogradov²

¹ ООО Decor Engineering

² Bauman Moscow State Technical University

В последнее время на машиностроительных предприятиях наблюдается тенденция к выполнению большинства технологических операций на одном станке. Такая технология обработки требует изготовления различных наружных и внутренних цилиндрических поверхностей не на токарных, а на фрезерных станках. Однако вопрос назначения подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей в научно-технической литературе не рассмотрен. Разработанная расчетная схема позволила исследовать влияние параметров фрезерования криволинейных поверхностей на максимальную толщину срезаемого слоя. Установлено, при фрезеровании выпуклых поверхностей максимальная толщина срезаемого слоя уменьшается относительно таковой при обработке плоскости, а у вогнутых увеличивается. Получены зависимости для расчета подачи на зуб по толщине срезаемого слоя при фрезеровании криволинейных поверхностей. Показано, что при обработке таких поверхностей нельзя использовать подачу, рассчитанную для фрезерования плоскости, т. е. ее необходимо корректировать. На корректировку подачи при обработке криволинейных поверхностей влияют относительный радиус их кривизны и относительная ширина фрезерования. Чем меньше эти величины, тем на большее значение следует корректировать подачу. Определена область значений параметров обработки, в которой целесообразно выполнять пересчет подачи относительно подачи, установленной для фрезерования плоскости.

Ключевые слова: подача при фрезеровании, толщина срезаемого слоя, фрезерование криволинейных поверхностей, контурное фрезерование, срезаемый слой

Recently, there has been a trend to perform most manufacturing operations on one machine-tool. Such technology requires machining various internal and external cylindrical surfaces using not turning but milling machines. However, the role of feed in milling curved surfaces is not sufficiently studied in the scientific literature. The developed calculation method makes it possible to study the influence of milling parameters for curved surfaces on the maximum thickness of the cut layer. It is established that when milling convex surfaces, the maximum thickness of the cut layer decreases relative to that for plane milling, while for concave surfaces it increases. Equations are obtained for calculating feed per tooth for the cut layer thickness when milling curved surfaces. It is shown that the feed calculated for milling flat surfaces cannot be used for curved surfaces and, therefore, should be adjusted. The relative radius of curvature and the relative thickness of milling have an impact on the feed adjustment. The smaller these values, the larger the value of the feed adjustment should be. The range of values that requires feed re-calculation relative to the feed for flat milling is determined.

Keywords: milling feed, thickness of cut layer, curved milling, contour milling, cut layer

В последнее время на машиностроительных предприятиях наблюдается тенденция к выполнению большинства технологических операций на одном станке. Такая технология обработки требует изготовления различных наружных и внутренних цилиндрических поверхностей на фрезерных станках. При этом концевая фреза совершает обкатку выпуклой и вогнутой цилиндрических поверхностей.

В работах [1, 2] показано, что толщины срезаемого слоя (СС) при обработке цилиндрических поверхностей и плоскостей отличаются друг от друга, а следовательно, должны различаться и подачи на зуб S_z . Учет этого различия позволяет повысить производительность обработки (при увеличении S_z) и снизить вероятность поломки фрезы (при уменьшении S_z). Поэтому выработка рекомендаций по назначению подачи на зуб при фрезеровании выпуклых и вогнутых поверхностей является актуальной.

В научно-технической литературе вопросам фрезерования криволинейных поверхностей уделено достаточно внимания. В работе [3] выполнен расчет подачи на зуб для дисковой фрезы переменного радиуса при условии постоянства толщины СС. Однако рассмотренная схема обработки и конструкция инструмента предназначены для фрезерования только валов с равноосным профилем (типа треугольника Рело) и кардинально отличаются от используемых при обработке криволинейных поверхностей на большинстве предприятий.

В публикациях [4, 5] введен коэффициент коррекции подачи, позволяющий минимизировать упругие перемещения фрезы. В работе [6] предложен алгоритм минимизации силы резания

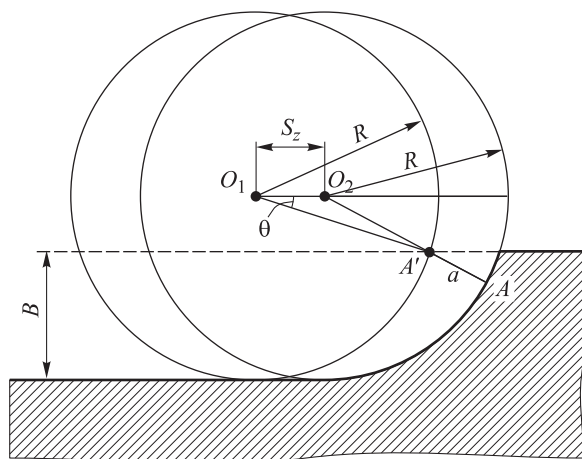


Рис. 1. Расчетная схема определения толщины СС при цилиндрическом фрезеровании плоскости

при обработке со ступенчатым припуском фрезой со сферическим концом. В статье [7] представлен алгоритм автоматизированного управления подачей и скоростью инструмента в зависимости от изменения глубины резания вдоль его траектории при торцовом фрезеровании сложных поверхностей.

Также исследовано сечение срезаемого слоя при фрезеровании плоскостей [8, 9] и винтовых или ступенчатых поверхностей [10, 11]. Изучены остаточное сечение и сечение СС при резбофрезеровании [12].

В работе [13] приведен алгоритм корректировки подачи при контурном фрезеровании криволинейных поверхностей. Однако он позволяет только исправлять погрешности, возникающие от привода подачи, толщина СС не рассмотрена.

В диссертации [14] предложена формула для определения толщины СС в каждой точке режущей кромки при фрезеровании наклонной поверхности, однако она применима только для криволинейной (радиусной) режущей кромки и при обработке плоскостей.

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема назначения подачи при фрезеровании криволинейных внутренних и наружных поверхностей в научно-технической литературе не рассмотрена, и сравнение толщины СС для различных форм обработанных поверхностей является актуальным.

Цель работы — получение выражений для определения подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей.

Толщина сечения СС при фрезеровании криволинейных поверхностей. При обработке плоскости цилиндрической фрезой или периферийными зубьями концевой фрезы максимальную толщину СС можно определить по расчетной схеме, на которой показаны следы от двух соседних зубьев инструмента (ось фрезы находится в точках O_1 и O_2) (рис. 1) [1].

В соответствии с расчетной схемой

$$a = AA' = R - O_2A'; \quad (1)$$

$$O_2A' = \sqrt{S_z^2 + R^2 - 2S_zR\cos\theta}; \quad (2)$$

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{R-B}{R}\right)^2} = \frac{\sqrt{2RB - B^2}}{R}, \quad (3)$$

где a — толщина СС в заданной точке; R — радиус фрезы; B — ширина фрезерования; S_z —

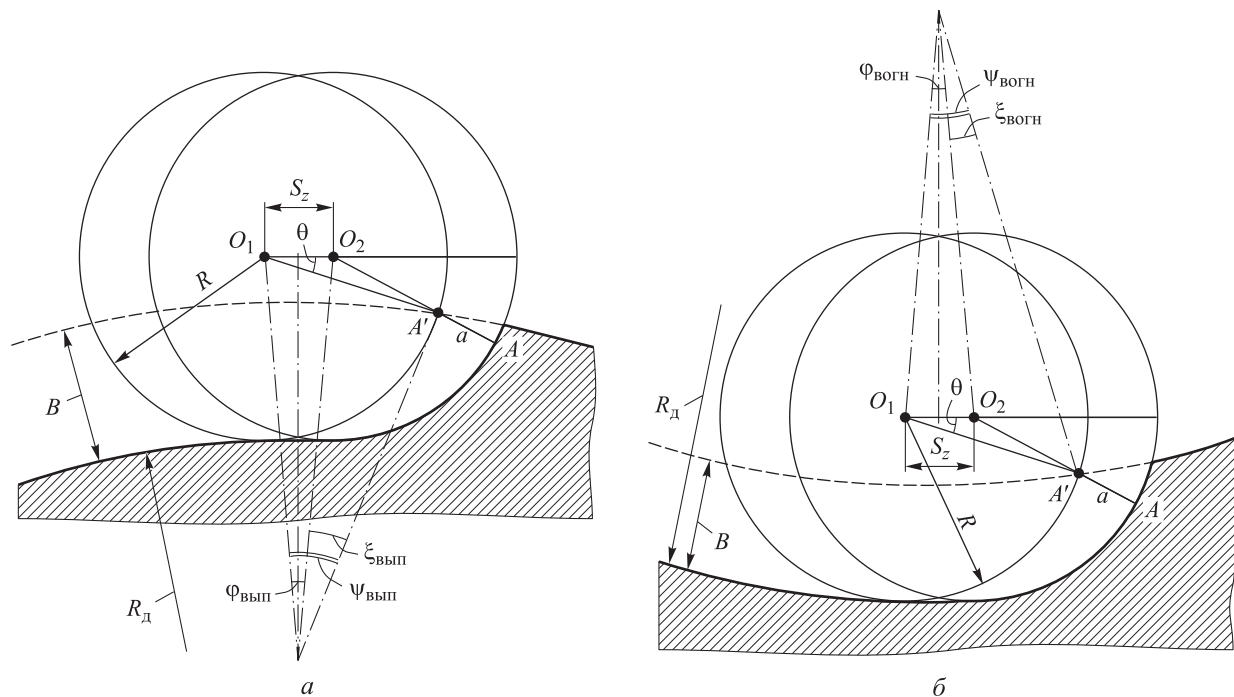


Рис. 2. Расчетные схемы определения максимальной толщины СС при цилиндрическом фрезеровании выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхностей

подача на зуб; θ — вспомогательный угол, определяемый по расчетной схеме.

Из системы уравнений (1)–(3) следует, что максимальную толщину СС при фрезеровании плоскостей можно рассчитать по формуле

$$a_{пл} = R - \sqrt{S_z^2 + R^2 - 2S_z \sqrt{2RB - B^2}}. \quad (4)$$

При фрезеровании выпуклых криволинейных поверхностей с заданным радиусом кривизны (рис. 2, а) выражение для максимальной толщины СС выводится на основе тех же уравнений, что и для фрезерования плоскости. При этом формула (3) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \\ &= \frac{\sqrt{R^2 - \left[(R_d + R) \cos \frac{\varphi_{вып}}{2} - (R_d + B) \cos \left(\psi_{вып} - \frac{\varphi_{вып}}{2} \right) \right]^2}}{R}, \end{aligned}$$

где R_d — радиус кривизны обработанной поверхности детали; $\varphi_{вып}$ и $\psi_{вып}$ — вспомогательные углы, определяемые по расчетной схеме, приведенной на рис. 2, а.

Выражение для определения максимальной толщины сечения СС при фрезеровании выпуклой поверхности принимает вид

$$a_{вып} = R - \sqrt{S_z^2 + R^2 - 2S_z \sqrt{R^2 - M^2}}, \quad (5)$$

где

$$M = (R_d + R) \cos \frac{\varphi_{вып}}{2} - (R_d + B) \cos \left(\psi_{вып} - \frac{\varphi_{вып}}{2} \right);$$

$$\cos \frac{\varphi_{вып}}{2} = \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi_{вып}}{2}} = \sqrt{1 - \left[\frac{S_z}{2(R_d + R)} \right]^2};$$

$$\psi_{вып} = \arccos \frac{(R_d + R)^2 + (R_d + B)^2 - R^2}{2(R_d + R)(R_d + B)}.$$

При фрезеровании вогнутых криволинейных поверхностей с заданным радиусом кривизны (рис. 2, б) максимальная толщина СС определяется аналогично предыдущему случаю с учетом изменения вспомогательных углов:

$$a_{вогн} = R - \sqrt{S_z^2 + R^2 - 2S_z \sqrt{R^2 - T^2}}, \quad (6)$$

где

$$T = (R_d + R) \cos \frac{\varphi_{вогн}}{2} - (R_d - B) \cos \left(\psi_{вогн} - \frac{\varphi_{вогн}}{2} \right);$$

$\varphi_{вогн}$ и $\psi_{вогн}$ — вспомогательные углы, определяемые по расчетной схеме, приведенной на рис. 2, б;

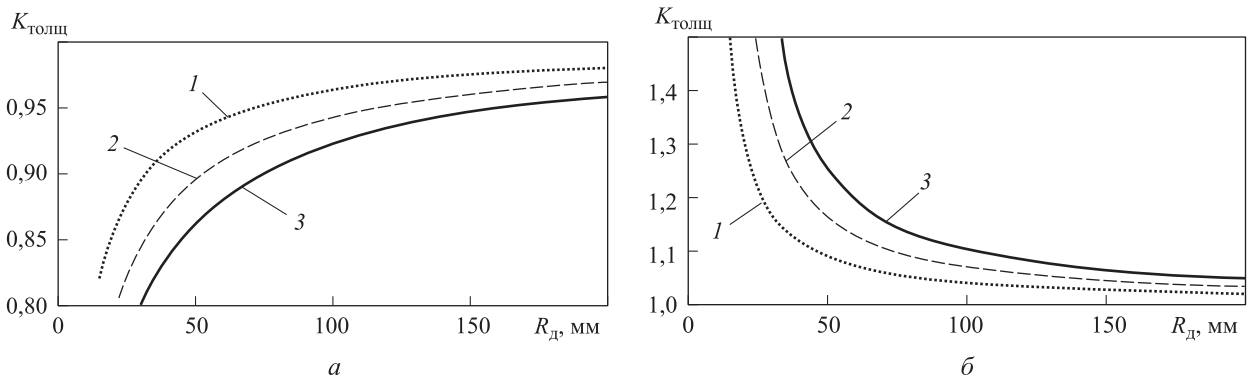


Рис. 3. Зависимости коэффициента изменения максимальной толщины СС $K_{\text{толщ}}$ от радиуса кривизны R_d выпуклой (а) и вогнутой (б) обработанных поверхностей при $B = 2$ мм, $S_z = 0,5$ мм/зуб и различных значениях радиуса фрезы:

1 — $R = 10$ мм; 2 — $R = 15$ мм; 3 — $R = 20$ мм

$$\cos \frac{\Phi_{\text{вогн}}}{2} = \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\Phi_{\text{вогн}}}{2}} = \sqrt{1 - \left[\frac{S_z}{2(R_d - R)} \right]^2};$$

$$\Psi_{\text{вогн}} = \arccos \frac{(R_d - R)^2 + (R_d - B)^2 - R^2}{2(R_d - R)(R_d - B)}.$$

Проверка формул (5), (6) для расчета максимальных толщин СС при фрезеровании выпуклых и вогнутых поверхностей заданного радиуса, выполненная при моделировании в графическом пакете Inventor, подтвердила их правильность.

Изменение максимальной толщины СС. Как следует из выражений (4)–(6), максимальные толщины СС при фрезеровании плоскости, выпуклой и вогнутой поверхностей неодинаковы. Их различие связано с параметрами, входящими в состав выражений (4)–(6): радиусом кри-

визны обработанной поверхности детали R_d , радиусом фрезы R , шириной фрезерования B и подачи на зуб S_z .

Для выявления степени влияния указанных параметров на максимальную толщину СС целесообразно выполнить анализ функций (4)–(6). Однако сделать этого нельзя, так как параметры обработки присутствуют в формулах в неявном виде. Поэтому исследование проведено только для наиболее характерных случаев фрезерования вогнутых и выпуклых поверхностей при $R = 10, 15, 20$ мм и $B = 2, 5, 8$ мм.

Изменение максимальной толщины СС удобно рассматривать в безразмерном виде. В связи с этим введен безразмерный коэффициент изменения максимальной толщины СС $K_{\text{толщ}}$, определяемый как отношение максимальной толщины СС при обработке выпуклой (вогнутой) поверхности $a_{\text{вып}}$ ($a_{\text{вогн}}$) к таковой при фрезеровании плоскости $a_{\text{пл}}$.

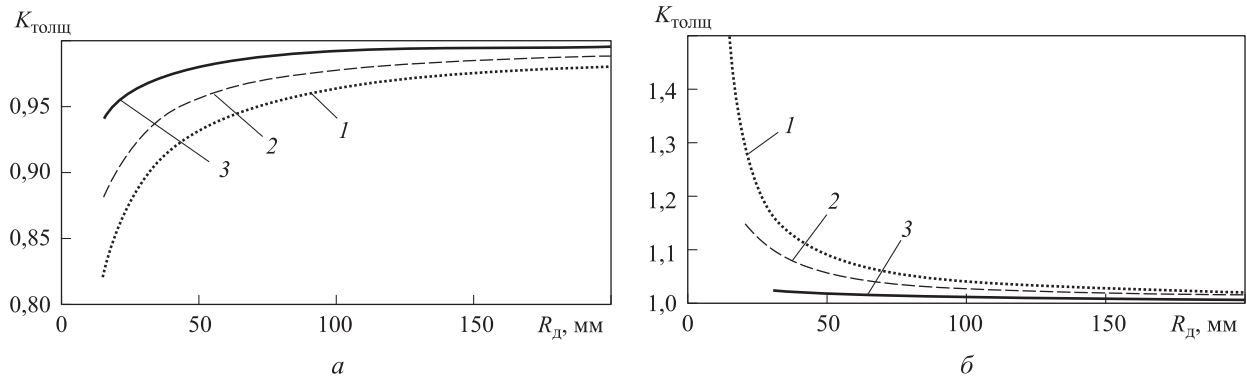


Рис. 4. Зависимости коэффициента изменения максимальной толщины СС $K_{\text{толщ}}$ от радиуса кривизны R_d выпуклой (а) и вогнутой (б) обработанных поверхностей при $R = 10$ мм, $S_z = 0,5$ мм/зуб и различных значениях ширины фрезерования:

1 — $B = 2$ мм; 2 — $B = 5$ мм; 3 — $B = 8$ мм

Коэффициент $K_{\text{толщ}}$ позволил представить утолщение (утонение) сечения СС в безразмерном виде в зависимости от параметров R_d , R , B (рис. 3 и 4).

Анализ полученных зависимостей позволил заключить следующее:

- при обработке выпуклой поверхности происходит утонение сечения СС (коэффициент изменения толщины сечения СС $K_{\text{толщ}} < 1$), а при фрезеровании вогнутой поверхности — утолщение ($K_{\text{толщ}} > 1$);

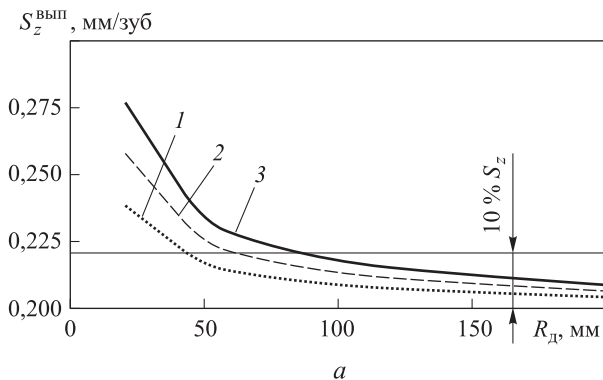
- чем меньше радиус кривизны обработанной поверхности R_d и ширина фрезерования B и чем больше радиус фрезы R , тем значительнее утолщение или утонение сечения СС;

- утолщение СС может достигать 40 %, а утонение — 20 %.

Подача на зуб при фрезеровании выпуклых и вогнутых поверхностей. На практике для назначения подачи на зуб при фрезеровании используют заданную толщину СС. Задаваясь некоторой толщиной СС $a_{\text{пл}}$, рассчитанной с помощью формулы (4) по подаче на зуб, назначенной для обработки плоскости, можно получить выражения для определения подачи на зуб при фрезеровании криволинейных поверхностей:

- выпуклой

$$S_z^{\text{вып}} = 2(R_d + R) \sin \frac{(\psi_{\text{вып}} - \xi_{\text{вып}})}{2} = 2(R_d + R) \times \sqrt{\frac{1 - (\cos \psi_{\text{вып}} \cos \xi_{\text{вып}} + \sin \psi_{\text{вып}} \sin \xi_{\text{вып}})}{2}}; \quad (7)$$



- вогнутой

$$S_z^{\text{вогн}} = 2(R_d + R) \sin \frac{(\psi_{\text{вогн}} - \xi_{\text{вогн}})}{2} = 2(R_d + R) \times \sqrt{\frac{1 - (\cos \psi_{\text{вогн}} \cos \xi_{\text{вогн}} + \sin \psi_{\text{вогн}} \sin \xi_{\text{вогн}})}{2}}, \quad (8)$$

где

$$\sin \frac{(\psi_{\text{вып}} - \xi_{\text{вып}})}{2} = \sqrt{\frac{1 - (\cos \psi_{\text{вып}} \cos \xi_{\text{вып}} + \sin \psi_{\text{вып}} \sin \xi_{\text{вып}})}{2}};$$

$$\xi_{\text{вып}} = \arccos \left[\frac{(R_d + R)^2 + (R_d + B)^2 - (R - a)^2}{2(R_d + R)(R_d + B)} \right];$$

$$\psi_{\text{вып}} = \arccos \frac{(R_d + R)^2 + (R_d + B)^2 - R^2}{2(R_d + R)(R_d + B)};$$

$$\sin \frac{(\psi_{\text{вогн}} - \xi_{\text{вогн}})}{2} = \sqrt{\frac{1 - (\cos \psi_{\text{вогн}} \cos \xi_{\text{вогн}} + \sin \psi_{\text{вогн}} \sin \xi_{\text{вогн}})}{2}};$$

$$\xi_{\text{вогн}} = \arccos \left[\frac{(R_d - R)^2 + (R_d - B)^2 - (R - a)^2}{2(R_d - R)(R_d - B)} \right];$$

$$\psi_{\text{вогн}} = \arccos \frac{(R_d - R)^2 + (R_d - B)^2 - R^2}{2(R_d - R)(R_d - B)}.$$

Эти выражения позволяют построить зависимости подачи на зуб от радиуса кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей, обрабатываемых фрезами, работающими в тех же условиях, что и при фрезеровании плоскости с за-

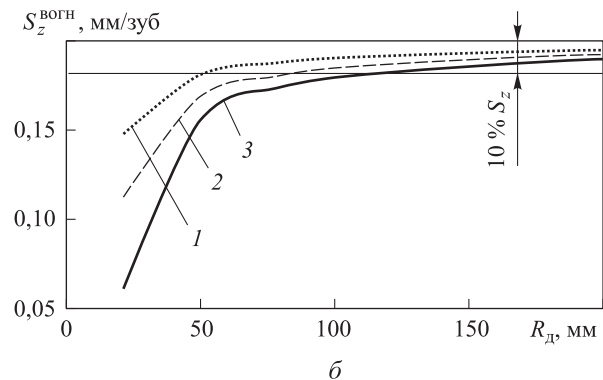


Рис. 5. Зависимости подачи на зуб S_z от радиуса кривизны R_d выпуклой (а) и вогнутой (б) обработанных поверхностей при $B = 1$ мм, $S_z = 0,2$ мм/зуб и различных значениях радиуса фрезы:

1 — $R = 10$ мм; 2 — $R = 15$ мм; 3 — $R = 20$ мм

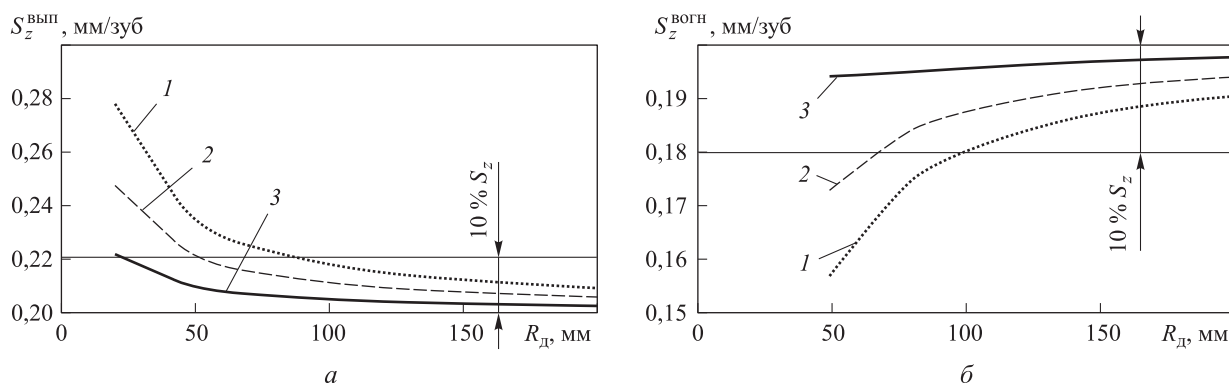


Рис. 6. Зависимости подачи на зуб S_z от радиуса кривизны R_d выпуклой (а) и вогнутой (б) обработанных поверхностей при $R = 20$ мм, $S_z = 0,2$ мм/зуб и различных значениях ширины фрезерования:

1 — $B = 1$ мм; 2 — $B = 8$ мм; 3 — $B = 15$ мм

данной подачей на зуб S_z . Такие зависимости, полученные при подаче $S_z = 0,2$ мм/зуб, показаны на рис. 5 и 6.

Анализ графиков, приведенных на рис. 5 и 6, показывает, что подача на зуб при фрезеровании вогнутой поверхности должна быть уменьшена, а при обработке выпуклой поверхности увеличена. При этом обеспечивается такая же максимальная толщина СС, как и при фрезеровании плоскости. В зависимости от параметров R_d , R и B подачу на зуб следует либо повышать до 1,5 раза для выпуклой поверхности, либо снижать до 5 раз для вогнутой.

Чем меньше радиус обработанной криволинейной поверхности R_d и ширина фрезерования B и чем больше радиус фрезы R , тем значительнее надо корректировать подачу. При уменьшении R и увеличении R_d и B расчетные подачи стремятся к значению S_z , вычисленному для фрезерования плоскости (в рассматриваемом примере к $S_z = 0,2$ мм/зуб).

Корректировка подачи обеспечит увеличение минутной подачи, а следовательно, позволит повысить производительность при обработке выпуклых поверхностей и снизить вероятность поломки фрезы из-за возрастания сил резания при фрезеровании вогнутых поверхностей.

Определение области корректировки подачи.

Для использования обнаруженного эффекта на практике важно выявить, при каких сочетаниях параметров R_d , R и B надо выполнять корректировку подачи, заданной для фрезерования плоскости, а при каких нет.

При таком подходе сначала следует определить, что считать существенным изменением подачи на зуб S_z , а что — несущественным, т. е.

ввести коридор корректировки подачи. Ширина коридора может колебаться в широких пределах, зависящих от организации производства. Для исследования выбраны два значения коридора: 5 и 10 %.

На рис. 5 и 6 коридор корректировки подачи графически отображен горизонтальными линиями, проведенными на расстоянии 10 % S_z и 5 % S_z ($S_z = 0,02$ мм/зуб). При обработке с параметрами, соответствующими точкам на графиках, лежащим вне коридора (выше для выпуклой поверхности и ниже для вогнутой), подачу следует корректировать. А для точек, находящихся внутри коридора, корректировку подачи проводить нецелесообразно.

Установлено, что для больших радиусов обработанной поверхности корректировка подачи не требуется при любых значениях параметров B и R . Однако при уменьшении R_d она нужна, и чем больше радиус инструмента и ширина фрезерования, тем значительнее должна быть корректировка.

Для выработки общих рекомендаций по корректировке подачи введен безразмерный коэффициент $K_R = R_d/R$ [2], который показывает, при каком радиусе поверхности, обрабатываемой заданной фрезой, следует проводить корректировку подачи. Если коэффициент K_R меньше расчетного значения для выбранного коридора, то корректировка подачи необходима.

Зависимости коэффициента K_R от радиуса фрезы при обработке выпуклой и вогнутой поверхностей с подачей $S_z = 0,2$ мм/зуб и различными шириной фрезерования и шириной коридора корректировки подачи ΔS_z приведены на рис. 7, а и б соответственно. Здесь показаны как расчетные данные (точки), так и линии тренда для них.

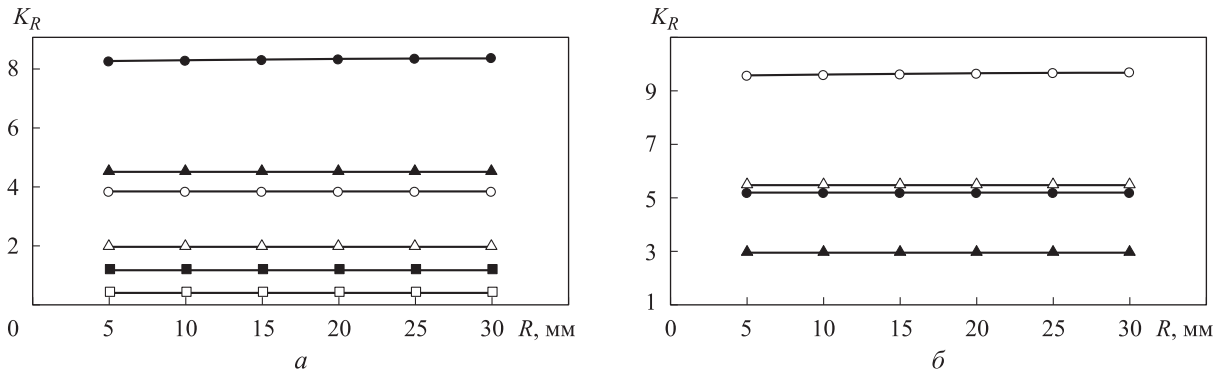


Рис. 7. Зависимости коэффициента K_R от радиуса фрезы R при обработке выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхностей с $S_z = 0,2$ мм/зуб и различными шириной фрезерования и шириной коридора корректировки подачи:

- — $B = 0,1 R$; $\Delta S_z = 10\%$; ▲ — $B = 0,5 R$; $\Delta S_z = 10\%$; ■ — $B = 0,9 R$; $\Delta S_z = 10\%$;
- — $B = 0,1 R$; $\Delta S_z = 5\%$; △ — $B = 0,5 R$; $\Delta S_z = 5\%$; □ — $B = 0,9 R$; $\Delta S_z = 5\%$

Как видно из рис. 7, коэффициент K_R не зависит от радиуса фрезы, но на него влияют ширина фрезерования, ширина коридора корректировки подачи и тип обработанной поверхности (вогнутая или выпуклая). Поэтому целесообразно определить изменение безразмерного коэффициента K_R от другого безразмерного коэффициента $K_B = B/R$.

Зависимости коэффициента K_R от коэффициента K_B при фрезеровании выпуклой и вогнутой поверхностей приведены на рис. 8, а и б соответственно, где показаны как расчетные данные (точки), так и линии тренда для них. Область под графиками показывает совокупность параметров обработки, при которой следует выполнять корректировку подачи при выбранной ширине коридора.

Анализ полученных результатов показывает, что при небольшой ширине фрезерования (например, при контурной обработке концевой фрезой) корректировку подачи следует проводить для поверхностей с радиусом кривизны примерно в 8–9 раз большим, чем радиус фрезы.

Кроме того, для обработанных поверхностей с радиусом кривизны, близким к радиусу R , необходимо корректировать подачу даже при ширине фрезерования до $0,6 \dots 0,8 R$ (например, при фрезеровании карманов и пазов).

Таким образом, на корректировку подачи при обработке криволинейных поверхностей влияют два фактора — относительный радиус кривизны поверхности K_R и относительная ширина фрезерования K_B . Чем меньше эти величины, тем на большее значение надо корректировать подачу.

Следует отметить, что для вогнутых поверхностей с большой шириной фрезерования приведенные формулы не могут быть использованы из-за изменения расчетной схемы, поэтому на графиках рис. 8, а отсутствуют данные для $K_B = 0,9$. Такое соотношение параметров обработки требует дополнительного исследования.

Использование безразмерных коэффициентов K_R и K_B позволяет несколько упростить выражения (5)–(8). С учетом того, что $R_d = K_R R$ и $B = K_B R$, получим следующие вы-

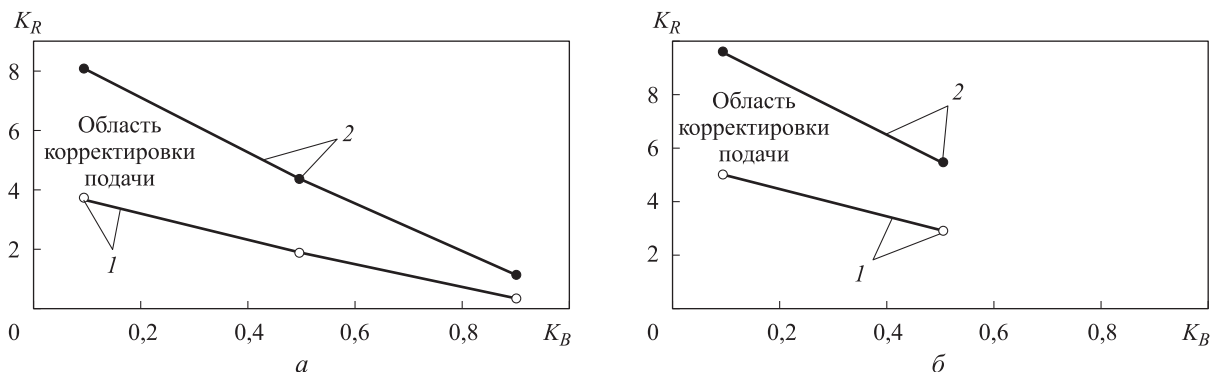


Рис. 8. Зависимости коэффициента K_R от коэффициента K_B при фрезеровании выпуклой (а) и вогнутой (б) поверхностей с $S_z = 0,2$ мм/зуб и шириной коридора корректировки подачи $\Delta S_z = 5$ (1) и 10% (2)

ражения для выпуклой и вогнутой обработанных поверхностей:

$$a_{\text{вып(вогн)}} = R - \sqrt{S_z^2 + R^2 - 2S_z R \sqrt{1 - N^2}}.$$

$$S_z^{\text{вып(вогн)}} = 2R(K_R + 1) \times \sqrt{\frac{1 - (\cos \psi_{\text{вып(вогн)}} \cos \xi_{\text{вып(вогн)}} + \sin \psi_{\text{вып(вогн)}} \sin \xi_{\text{вып(вогн)}})}{2}},$$

$$N = (K_R \pm 1) \cos \frac{\varphi_{\text{вып(вогн)}}}{2} -$$

$$\text{где } -(K_R \pm K_B) \cos \left(\psi_{\text{вып(вогн)}} - \frac{\varphi_{\text{вып(вогн)}}}{2} \right);$$

$$\varphi_{\text{вып(вогн)}} = \arccos \left\{ 2 \sqrt{1 - \left[\frac{S_z}{2R(K_R \pm 1)} \right]^2} \right\};$$

$$\psi_{\text{вып(вогн)}} =$$

$$= \arccos \frac{R^2(K_R \pm 1)^2 + R^2(K_R \pm K_B)^2 - R^2}{2R^2(K_R \pm 1)(K_R \pm K_B)} =$$

$$= \arccos \frac{(K_R \pm 1)^2 + (K_R \pm K_B)^2 - 1}{2(K_R \pm 1)(K_R \pm K_B)};$$

$$\xi_{\text{вып(вогн)}} =$$

$$= \arccos \left[\frac{R^2(K_R \pm 1)^2 + R^2(K_R \pm K_B)^2 - (R - a)^2}{2R^2(K_R \pm 1)(K_R \pm K_B)} \right] =$$

$$= \arccos \left[\frac{(K_R \pm 1)^2 + (K_R \pm K_B)^2 - (1 - a/R)^2}{2(K_R \pm 1)(K_R \pm K_B)} \right].$$

Выводы

1. Получены выражения, позволяющие рассчитать максимальную толщину СС и подачу на зуб при фрезеровании криволинейных поверхностей.

2. Обнаружено, что при фрезеровании выпуклых поверхностей максимальная толщина срезаемого слоя уменьшается относительно таковой при обработке плоскости, а у вогнутых увеличивается. Утолщение СС может достигать 40 %, а утонение — 20 %.

3. Показано, что при фрезеровании выпуклых поверхностей назначаемую подачу на зуб следует повышать относительно значения, установленного для обработки плоскости, а у вогнутых — снижать.

4. Степень корректировки подачи растет при увеличении радиуса фрезы и уменьшении радиуса обработанной поверхности и ширины фрезерования. В зависимости от этих параметров подачу следует либо увеличивать до 1,5 раза, либо уменьшать до 5 раз.

5. На корректировку подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей влияют относительный радиус их кривизны и относительная ширина фрезерования. Чем меньше эти величины, тем на большее значение надо корректировать подачу.

6. Установлено, что особенно важно корректировать подачу при малых ширине фрезерования и радиусе кривизны обработанной поверхности, близких к радиусу фрезы.

Литература

- [1] Матасова Е.Ю. Корректировка подачи при фрезеровании цилиндрических поверхностей. *Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. Матер. Всерос. науч.-техн. конф.*, Москва, 4–7 апреля 2017, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Изд-во ООО «КванторФорм», 2017, с. 50–52.
- [2] Матасова Е.Ю. Определение области корректировки подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей. *Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии. Матер. Всерос. науч.-техн. конф.*, Москва, МГТУ им. Н.И. Баумана, 3–6 апреля 2018, Москва, Изд-во ООО «КванторФорм», 2018, с. 67–69.
- [3] Куц В.В., Максименко Ю.А. Оценка величины подачи на зуб при моделировании процесса фрезерования валов с равноосным контуром. *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Матер. X Междунар. науч.-практ. конф.*, Курск, 19–23 марта 2013, Курск, Университетская книга, 2013, с. 176–178.
- [4] Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Фрезерование сложных деталей с коррекцией положения инструмента. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2016, вып. 8, ч. 2, с. 111–119.

- [5] Орлов А.А. Методика расчета режимов резания при контурном фрезеровании на станках с ЧПУ. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2012, № 5, с. 265–267.
- [6] Козлов А.М., Малютин Г.Е. Расчет подачи при чистовом фрезеровании вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ. *Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Матер. Междунар. науч.-техн. конф.*, Севастополь, 14–15 сентября 2015, Севастополь, Севастопольский государственный университет, 2015, с. 40–45.
- [7] Рохин О.В. Фрезерование поверхностей крупногабаритных гребных винтов на основе автоматизированного управления режимами резания. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2006, № 12. URL: <http://engineering-science.ru/doc/62715.html> (дата обращения 11 марта 2019).
- [8] Потапова М.С., Виноградов Д.В. Компьютерное моделирование рельефа поверхности, обработанной фрезой с криволинейной режущей кромкой. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 6, с. 42–55. URL: <http://engineering-science.ru/doc/778064.html> (дата обращения 15 марта 2019), doi: 10.7463/0615.0778064
- [9] Виноградов Д.В., Мелкерис Т.В. Определение силы резания для криволинейного сечения СС. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 124–135. URL: <http://engineering-science.ru/doc/745856.html> (дата обращения 15 марта 2019), doi: 10.7463/1214.0745856
- [10] Фасхутдинов А.И., Емельянов Д.В., Блинова А.С. Влияние величины СС на производительность механической обработки. *Прогрессивные технологии и процессы. Сб. науч. ст. 2-й Междунар. молодеж. науч.-техн. конф.*, Курск, 24–25 сентября 2015, Курск, Университетская книга, 2015, т. 3, с. 111–115. URL: <http://regionika.ru/konf/%CC%CB-09%20%D23.pdf> (дата обращения 15 марта 2019).
- [11] Батуев В.В. Расчет толщины СС при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск. *Известия Челябинского научного центра*, 2006, вып. 3(33), с. 119–123.
- [12] Мальков О.В., Литвиненко А.В., Малькова Л.Д., Синцова И.В. Исследование технологических возможностей планетарного фрезерования наружных и внутренних цилиндрических поверхностей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 1, с. 86–98.
- [13] Андросова А.В., Федотов А.В. Управление вектором скорости подачи при контурном фрезеровании на станке с ЧПУ. *Автоматизация, мехатроника, информационные технологии. Матер. V Междунар. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых*, Омск, 19 мая 2015, Омск, ОГТУ, 2015, с. 129–132.
- [14] Батуев В.А. *Повышение производительности и точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем стабилизации сил резания*. Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, ЧПИ, 1986. 248 с.

References

- [1] Matasova E.Yu. Feed adjustment for milling cylindrical surfaces. *Studentcheskaya nauchnaya vesna: Mashinostroitel'nyye tekhnologii. Mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Student Scientific Spring: Engineering Technologies. Material of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, KvantorForm publ., 2017, pp. 50–52.
- [2] Matasova E.Yu. Determination of the feed adjustment area during milling curved surfaces. *Studentcheskaya nauchnaya vesna: Mashinostroitel'nyye tekhnologii. Mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Student Scientific Spring: Engineering Technologies. Material of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, KvantorForm publ., 2018, pp. 67–69.
- [3] Kuts V.V., Maksimenko Yu.A. Estimation of the feed per tooth when modeling the process of milling shafts with equiaxial contour. *Sovremennyye instrumental'nye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii. Mat. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern tool systems,

- information technologies and innovations. Materials of the Xth International Scientific Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga publ., 2013, pp. 176–178 (in Russ.).
- [4] Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kuznetsov S.F. Complex parts milling with tool position correction. *Izvestiya Tula State University. Tekhnicheskie nauki*, 2016, iss. 8, pt. 2, pp. 111–119 (in Russ.).
- [5] Orlov A.A. Calculation method for contour cutting on CNC milling. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2012, no. 5, pp. 265–267 (in Russ.).
- [6] Kozlov A.M., Malyutin G.E. Calculation of feed for finishing milling of concave surfaces on CNC machines. *Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii. Mat. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Current trends and prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Materials of the international scientific and technical conference]. Sevastopol, SevSU publ., 2015, pp. 40–45 (in Russ.).
- [7] Rokhin O.V. Milling surfaces of large-sized propellers based on automated management of cutting conditions. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2006, no. 12. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/62715.html> (accessed 11 March 2019).
- [8] Potapova M.S., Vinogradov D.V. Computer Modeling of the Surface Texture Treated by Mill with Curved Cutting Edge. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 6, pp. 42–55 (in Russ.). Available at: <http://engineering-science.ru/doc/778064.html> (accessed 15 March 2019), doi: 10.7463/0615.0778064
- [9] Vinogradov D.V., Melkeris T.V. Determining a Cutting Force for Curved Section of Cutting Layer. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 124–135 (in Russ.). Available at: <http://engineering-science.ru/doc/745856.html> (accessed 15 March 2019), doi: 10.7463/1214.0745856
- [10] Faskhutdinov A.I., Emel'yanov D.V., Blinova A.S. The influence of the cut layer on the performance of machining. *Progressivnye tekhnologii i protsessy: sb. nauch. statey 2 Mezhdunar. molodezhnaya nauch.-tekhn. konf.* [Progressive technologies and processes. Collection of scientific articles 2 of the International Youth Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2015, vol. 3, pp. 111–115 (in Russ.). Available at: <http://regionika.ru/konf/%CC%CB-09%20%D23.pdf> (accessed 15 March 2019).
- [11] Batuev V.V. Calculation of the thickness of the layer being cut when milling spatially complex surfaces with a stepped allowance. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*, 2006, iss. 3(33), pp. 119–123 (in Russ.).
- [12] Mal'kov O.V., Litvinenko A.V., Mal'kova L.D., Sintsova I.V. Study of Technological Feasibilities of Planetary Milling Outside and Inside Cylindrical Surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2007, no. 1, pp. 86–98 (in Russ.).
- [13] Androsova A.V., Fedotov A.V. Control of the velocity vector of supply during the contour milling on the machine tool with CHPU. *Avtomatizatsiya, mekhatronika, informatsionnye tekhnologii. Mat. V Mezhdunar. nauch.-tekhn. internet-konfer. molodykh uchenykh* [Automation, mechatronics, information technology. Materials of the V International Scientific and Technical Internet Conference of Young Scientists]. Omsk, 2015, pp. 129–132.
- [14] Batuev V.A. *Povyshenie proizvoditel'nosti i tochnosti frezerovaniya prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostey na stankakh s CHPU putem stabilizatsii sil rezaniya*. Kand. Diss. [Improving the performance and accuracy of milling spatially complex surfaces on CNC machines by stabilizing cutting forces. Cand. Diss.]. Chelyabinsk, 1986. 248 p.

Информация об авторах

МАТАСОВА Елизавета Юрьевна — конструктор. ООО «Декор Инжиниринг» (121351, Москва, Российская Федерация, Молодогвардейская ул., д. 61, стр. 20, e-mail: lizasanm@rambler.ru).

ВИНОГРАДОВ Дмитрий Вячеславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vdv2010@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Матасова Е.Ю., Виноградов Д.В. Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 10, с. 14–24, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-14-24

Please cite this article in English as:

Matasova E.Y., Vinogradov D.V. Feed adjustment when milling curved surfaces. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 10, pp. 14–24, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-14-24

Information about the authors

MATASOVA Elizaveta Yurievna — Designer. ООО Decor Engineering (121351, Moscow, Russian Federation, Molodogvardeyskaya St., Bldg. 61, Block 20, Floor 3, e-mail: lizasanm@rambler.ru).

VINOGRADOV Dmitrii Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vdv2010@bk.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2 издание учебного пособия
Л.П. Мухамедова

«Основы проектирования транспортных космических систем»

Изложены основы проектирования транспортных космических систем с жидкостными ракетными двигателями, предназначенных для доставки полезных грузов на целевые орбиты и траектории назначения, и их составляющих: ракет-носителей и разгонных блоков. Рассмотрено формирование граничных условий решения задач баллистического проектирования. Предложены инженерные методики выбора основных проектных параметров и определения энергомассовых и геометрических характеристик проектируемого изделия в составе ракетного комплекса. Приведены численные примеры решения задач баллистического проектирования транспортных космических систем.

Для студентов старших курсов машиностроительных вузов, а также для специалистов, занимающихся разработкой ракетно-космических систем.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru