

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра материаловедения и технологии машиностроения

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ
УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ НА СТАНКЕ**

Выполнение лабораторно-практической работы

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составитель
И. Д. Соколова

Санкт-Петербург
2026

Утверждено
на заседании кафедры МиТМ
17.02.2026 г., протокол № 4

Рецензент А. А. Таразанов

Методические указания соответствуют программе и учебному плану дисциплины «Основы технологии машиностроения» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». Указания содержат алгоритм определения погрешности установки заготовки на фрезерном станке. Приведены основные положения теории базирования: классификация баз, принципы выбора баз, условия выбора схемы базирования. Расчеты погрешностей базирования и закрепления вала приводятся для определения возможности его установки на призму при фрезеровании шпоночного паза.

Методические указания предназначены для бакалавров очной и очно-заочной форм обучения.

Утверждены Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 16.04.2026 г. Рег. № 5007/26

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ	5
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
ВЫБОР СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ШПОНОЧНОГО ПАЗА	9
ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ НА ПРИЗМУ	10
ПОГРЕШНОСТЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ УСТАНОВКЕ НА ПРИЗМУ	12
Режимы резания при фрезеровании шпоночного пазы.....	12
Расчет силы резания при фрезеровании шпоночного пазы.....	15
Силы закрепления заготовки в призме	20
Задание	21
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	22
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23

ВВЕДЕНИЕ

Под установкой заготовок понимают последовательное выполнение двух приемов: базирования и закрепления. Базирование осуществляется доведением до полного контакта баз заготовки с установочными элементами приспособления, а закрепление – приложением сил и пар сил к заготовке для обеспечения постоянства ее положения, достигнутого при базировании.

Обрабатываемые детали в любой стадии обработки и в готовом виде имеют отклонения от геометрически точной формы и номинальных размеров, заданных чертежами. Эти отклонения (погрешности) должны лежать в пределах заданных допусков.

Различают:

1) погрешности отдельных элементарных поверхностей в виде отклонения их размеров от номинала и искажений формы в продольных и поперечных сечениях;

2) погрешности во взаимном расположении элементарных поверхностей и их осей в виде отклонения координирующих размеров от номинала и искажений в параллельности, перпендикулярности, соосности и т. д.

Погрешности установки, связанные с базированием, закреплением и неточностью приспособлений, оказывают прямое влияние на пространственные отклонения, то есть на отклонения координирующих размеров и соотношений, и не оказывают влияния на отклонения размеров и формы отдельных поверхностей, за исключением случаев зажима тонкостенных деталей.

Суммарная погрешность любого координирующего размера складывается из первичных погрешностей, которые принято делить на три группы:

- 1) погрешность установки деталей;
- 2) погрешность настройки станка;
- 3) погрешность обработки.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: формирование практических навыков по определению погрешностей установки заготовки на призму при фрезеровании шпоночного паза.

Задачи выполняемой работы:

- изучить теоретические сведения о причинах возникновения погрешности установки заготовки на станке;
- получить задание от преподавателя;
- вычислить погрешность базирования заготовки при установке ее в призму для фрезерования шпоночного паза;
- определить погрешность закрепления заготовки в призме;
- произвести расчет погрешности установки заготовки в призме.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Теория базирования является общей и распространяется на все тела, которые могут рассматриваться как твердые (в том числе и на изделия машино- и приборостроения в сборе), и на все стадии производственного процесса: механическая обработка, транспортирование, измерение, сборка, ремонт, эксплуатация и т. д.

Базой называется поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке (детали, изделию) и используемая для базирования.

Согласно ГОСТ 21495-76 базы можно классифицировать по нескольким признакам следующим образом.

1) *По назначению* базы делятся на:

а) *конструкторские* – для определения положения детали или сборочной единицы в изделии (основные), или определения положения присоединяемого к ним изделия (вспомогательные);

б) *технологические* – для определения положения заготовки (детали, изделия) при их изготовлении или ремонте;

в) *измерительные* – для определения относительного положения заготовки (детали, изделия) и средств измерения.

2) *По лишаемым степеням свободы* различают следующие базы:

а) *установочную*, которая лишает объект трех степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворотов вокруг двух других осей;

б) *направляющую*, которая лишает объект двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворот вокруг другой оси;

в) *опорную*, которая лишает объект одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси;

г) *двойную направляющую*, которая лишает объект четырех степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей и поворотов вокруг этих же осей;

д) *двойную опорную*, которая лишает объект двух степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей.

3) По характеру проявления база может быть:

а) *скрытой* – в виде воображаемой плоскости, оси или точки;

б) *явной* – в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок.

Конструктор, пользуясь конструкторскими базами, задает размеры и (или) положение отдельных простейших поверхностей на чертеже детали. Технологи важно определить по чертежу основную конструкторскую базу данной детали или сборочной единицы (например, торец и отверстие зубчатого колеса), чтобы правильно построить технологический процесс обработки детали или сборки изделия.

Конструкторской базой обрабатываемой поверхности называется совокупность элементов детали (заготовки), с которыми обрабатываемая поверхность или ее ось связана координирующими размерами или допусками расположения на чертеже (операционном эскизе) (рис. 1).



Рисунок 1. Примеры определения положения конструкторских баз для обрабатываемого сквозного отверстия (а) и ступенчатого вала (б)

Под элементом детали понимают поверхность, линию пересечения поверхностей, ось или плоскость симметрии, точку, которые принадлежат детали.

Если два элемента детали связаны координирующими размерами или допусками взаимного расположения, то любой из них можно принимать за базу относительно другого (принцип обратимости конструкторских баз).

Обрабатывают деталь обычно на разных станках согласно операционным эскизам. На каждой операции (установке) деталь предварительно базируют на

станке, затем закрепляют и производят обработку одной или нескольких поверхностей. Каждая обрабатываемая поверхность (группа поверхностей) должна иметь свою технологическую базу.

Измерительной базой называется поверхность, линия или точка, от которых производится отсчет выполняемых размеров при обработке или измерении заготовок, а также при проверке взаимного расположения поверхностей деталей или элементов изделия (параллельности, перпендикулярности, соосности и др.). Измерительная база должна совпадать с конструкторской.

Технологической базой обрабатываемой поверхности называется совокупность элементов детали (заготовки), с помощью которых эту поверхность или ее ось правильно ориентируют на станке относительно траектории режущего инструмента. В некоторых случаях, наоборот, режущий инструмент ориентируют относительно технологической базы обрабатываемой поверхности.

Для обеспечения неподвижности заготовки или изделия в избранной системе координат на них необходимо наложить шесть двухсторонних геометрических связей, для создания которых необходим комплект баз. Если в соответствии со служебным назначением изделие должно иметь определенное число степеней свободы, то соответствующее число связей снимается. Лишняя деталь всех шести степеней свободы, получают схему полного базирования, которая строится в соответствии с *правилом шести точек*. Формулируется оно следующим образом: для полного базирования детали с лишением ее всех шести степеней свободы необходим комплект из трех баз, несущих шесть опорных точек (под опорной точкой понимают точку, символизирующую одну из связей заготовки или изделия с выбранной системой координат).

Выбор баз имеет большое значение при проектировании технологических процессов. При выборе баз желательно в качестве технологической базы использовать конструкторскую или измерительную базу обрабатываемой поверхности, т. е. соблюдать *принцип совмещения баз*. В этом случае погрешности базирования при изготовлении или измерении детали будут равны нулю. Возможность совмещения технологической, конструкторской и измерительной баз при прохождении детали всего производственного цикла (от изготовления до измерения, эксплуатации и ремонта) должна учитываться конструктором в процессе проектирования и технологом при разработке технологического процесса.

Кроме того, при выборе технологических баз следует придерживаться *принципа постоянства баз* на основных операциях механической обработки, т. е. по возможности использовать в качестве технологических баз одни и те же поверхности (элементы) детали. Целесообразность соблюдения этого принципа особенно очевидна, если конструкторские (измерительные) базы при выполнении различных операций переменны, и в связи с этим трудно осуществить принцип совмещения баз. Для соблюдения принципа постоянства баз в ряде случаев на деталях (заготовках) создают вспомогательные (дополнительные) поверхности, не имеющие

конструктивного назначения, но используемые в качестве технологических баз. К ним относятся центровые гнезда на валах, специально обработанные отверстия в корпусных деталях, центрирующие пояски и выточки на платиках (платах) и др.

Если по условиям обработки не удастся выдержать принцип постоянства баз, то в качестве новой базы принимают обработанную поверхность, по возможности наиболее точную и обеспечивающую жесткость установки заготовки. Если вновь принятая база не является конструкторской (измерительной), то производят расчет допуска на полученный размер с учетом появляющейся погрешности базирования и, если необходимо, ужесточают допуск на размер, определяющий положение новой технологической базы относительно конструкторской.

Соблюдение принципа постоянства баз позволяет уменьшить погрешности базирования, связанные с переменной технологических баз и зависящие от состояния поверхностей и точности их расположения относительно ранее применявшихся баз.

Например, при фрезеровании паза (рис. 2а) должны быть выдержаны размеры 1 и 2. Для размера 1 принцип совмещения баз выдержан, т. к. технологическая и конструкторская базы совпадают (плоскость 1), а для размера 2 этот принцип не соблюдается, поскольку технологической базой является плоскость 3, конструкторской – плоскость 2. Поэтому погрешность базирования для размера 1 будет равна нулю ($\varepsilon_{61} = 0$), а для размера 2 она будет равна допуску на базисный размер Н ($\varepsilon_{62} = T_H$). Базисный размер – это расстояние между конструкторской и технологической (измерительной) базами или их проекциями на направление выполняемого размера. Аналогично имеем (рис. 2б): для размера 2 – принцип совмещения баз выдерживается ($\varepsilon_{62} = 0$), для размера 1 – не выдерживается ($\varepsilon_{61} = T_L$).

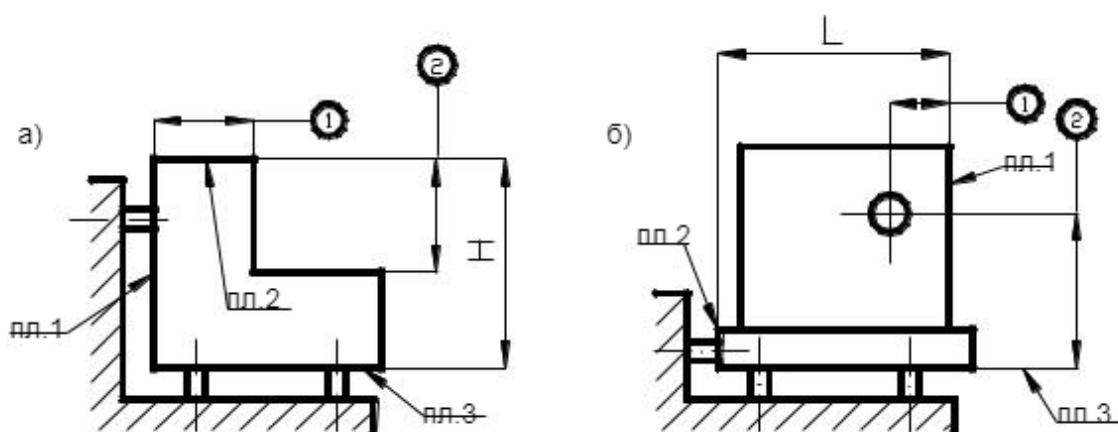


Рисунок 2. Базирование заготовки при фрезеровании углового паза (а) и сверлении отверстия (б)

Рассмотрим появление погрешности установки вала на станке для фрезерования на нем шпоночного паза.

ВЫБОР СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ШПОНОЧНОГО ПАЗА

Для фрезерования шпоночного паз на цилиндрическом валу применяется классическая и наиболее эффективная схема базирования, известная как «двойная направляющая база + опорная база + упор от поворота» (рис. 3). Рассмотрим ее детали.

Двойная направляющая база. В качестве основной установочной поверхности используется длинная V-образная призма со стандартным углом $\alpha = 90^\circ$. Цилиндрическая поверхность вала устанавливается в эту призму, которая, благодаря своей геометрии, лишает заготовку четырех степеней свободы. Это перемещения вдоль осей Y и Z, а также повороты вокруг этих осей.

V-образная призма обеспечивает точное центрирование вала, предотвращая его поперечное и вертикальное смещение. Длинная призма дополнительно стабилизирует заготовку по всей длине, минимизируя влияние неточностей формы, что особенно важно для длинных валов.

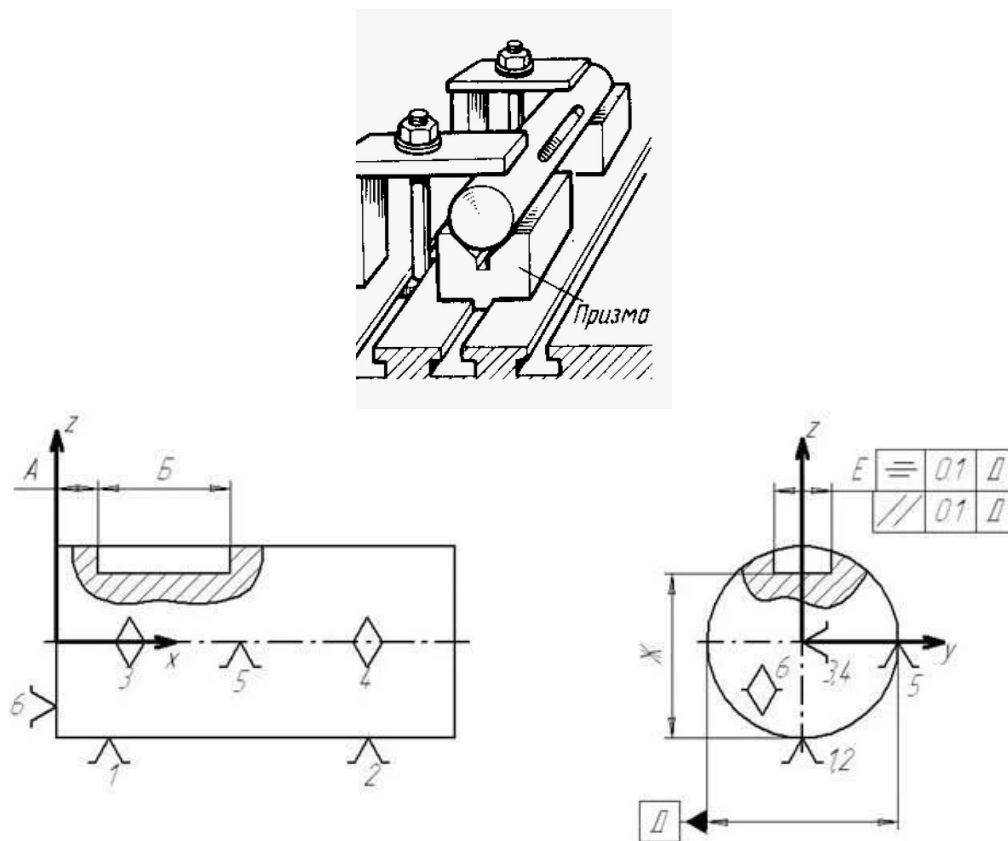


Рисунок 3. Выбор схемы базирования

Опорная база. Один из торцов вала прижимается к жесткому упору. Этот упор лишает заготовку пятой степени свободы – перемещения вдоль оси X – вдоль оси вала.

Выбор торца в качестве опорной базы обусловлен обычно более высокой точностью его обработки по сравнению с другими продольными поверхностями,

а также удобством фиксации и контроля. Это гарантирует точное позиционирование заготовки по длине.

Упор от поворота (установочный шип). Шестая степень свободы – поворот вокруг собственной оси вала (ось X) – ограничивается специальным упором. Этот упор может быть выполнен в виде штифта, входящего в ранее обработанное отверстие или в паз на заготовке, или в виде установочного шипа самого приспособления, входящего в паз стола станка. В случае отсутствия готового элемента на заготовке, упор может воздействовать на специальный элемент, закрепленный на заготовке или на ее необработанную, но геометрически контролируемую поверхность, предотвращая вращение. Это обеспечивает точное угловое положение паза относительно других элементов вала, что исключает ошибки сборки шпоночного соединения.

Таким образом, комбинация V-образной призмы, торцевого упора и упора от поворота создает надежную и однозначную кинематическую схему, полностью лишаящую заготовку всех шести степеней свободы, что является обязательным условием для получения качественного и точного шпоночного паза. Это фундаментальный принцип, без которого невозможно обеспечить заданные параметры обработки.

ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ НА ПРИЗМУ

Погрешность базирования ε_b является одной из ключевых составляющих общей погрешности обработки. Она образуется при несовпадении технологических и измерительных баз в связи с колебанием размеров заготовок в пределах поля допуска, установленного на выполнение предшествующих операций (переходов).

Численно погрешность базирования равна разности расстояний измерительной базы относительно установленного на размер инструмента.

Рассмотрим схему установки вала диаметром d в призме при фрезеровании шпоночного паза, размер которого h задан от различных конструкторских баз (рис. 4). Заготовка устанавливается на призме приспособления, и фреза настроена на размер, рассчитанный на номинальный диаметр заготовки.

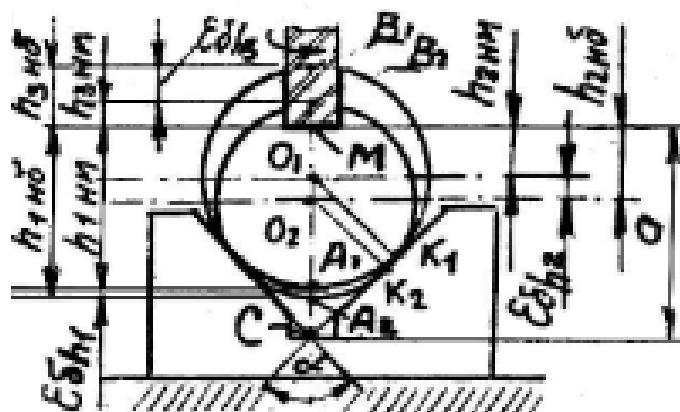


Рисунок 4. Схема для расчета погрешности базирования

Во всех случаях вал устанавливают по вспомогательной базе и, таким образом, погрешность базирования неизбежна и зависит от допуска на диаметр вала d и угла призмы α .

Для расчета погрешностей базирования предположим, что на призме установлен вал с наибольшим предельным диаметром $d_{\text{нб}}$ и наименьшим предельным диаметром $d_{\text{нм}}$ (рис. 4).

При выдерживании размеров h_1 , h_2 и h_3 технологическими базами служат образующие $K_1(K_2)$, измерительными соответственно – $A_1(A_2)$, $O_1(O_2)$ и $B_1(B_2)$. Проецируя предельные положения этих баз на направление выполняемых размеров, определим погрешности базирования для каждого из выполняемых размеров. Так погрешность базирования для размера h_1 (рис. 4) определим как:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{б}1} &= h_{1\text{нб}} - h_{1\text{нм}} = (A_2 O_1 + O_1 M) - (A_1 O_1 + O_1 M) = A_2 O_1 - A_1 O_1 = \\ &= A_2 O_2 + O_1 O_2 - A_1 O_1 = \frac{d_{\text{нм}}}{2} - \frac{d_{\text{нб}}}{2} + O_1 O_2 = -\frac{T_d}{2} + (C O_1 - C O_2) = -\frac{T_d}{2} + \\ &+ \left(\frac{A_1 K_1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{A_2 K_2}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) = -\frac{T_d}{2} + \left(\frac{d_{\text{нб}}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{d_{\text{нм}}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \right) = \frac{T_d}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right),\end{aligned}$$

где $T_d = d_{\text{нб}} - d_{\text{нм}}$ – допуск (разница между предельными размерами вала).

Аналогично, погрешность базирования для размера h_2 определяется:

$$\varepsilon_{\text{б}2} = \frac{T_d}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}},$$

,и для размера h_3 имеет вид:

$$\varepsilon_{\text{б}3} = \frac{T_d}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right).$$

В рассмотренных примерах погрешности базирования выражались через разность предельных размеров (или допуск) заготовки. При этом получаются значения погрешностей, наибольшие из возможных. При обработке партии заготовок величина погрешности базирования для каждой отдельной заготовки является случайной, зависящей от действительного размера заготовки и редко достигает своего максимума.

ПОГРЕШНОСТЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ УСТАНОВКЕ НА ПРИЗМУ

Погрешностью закрепления (ϵ_3) называется разность предельных расстояний измерительной базы относительно установленного на размер инструмента в результате смещения обрабатываемых заготовок от действия зажимной силы. Смещения измерительной базы заготовок происходят в результате деформации звеньев в цепи заготовка – установочные элементы – корпус приспособления, через которую передается зажимное усилие.

Наибольшая величина смещений образуется в контакте заготовка – установочные элементы приспособления. Остальные звенья проектируют таким образом, чтобы деформации были незначительны.

Величины смещений зависят нелинейно от усилий зажима заготовки и в рассматриваемом случае могут быть приближенно определены по формуле:

$$\epsilon_3 = 2^n P_{cp}^n \frac{2(22-0,03R_a^2)}{d} \frac{K^{n-1}}{(K+1)^n}, \text{ мкм,}$$

где P_{cp} – среднее усилие, приходящееся на одну опору, кгс;

K – коэффициент, учитывающий разброс величины усилия зажима. Обычно принимают $K = 1,3 - 1,6$;

n – показатель степени, который для рассматриваемых условий можно принять равным $n = 0,5$;

R_a – шероховатость поверхности шпоночного паза;

d – диаметр заготовки, мм.

Режимы резания при фрезеровании шпоночного паза

Шпоночные пазы на валах подразделяют на сквозные, открытые, закрытые и полузакрытые. Они бывают призматическими, сегментными (рис. 5в), клиновыми.

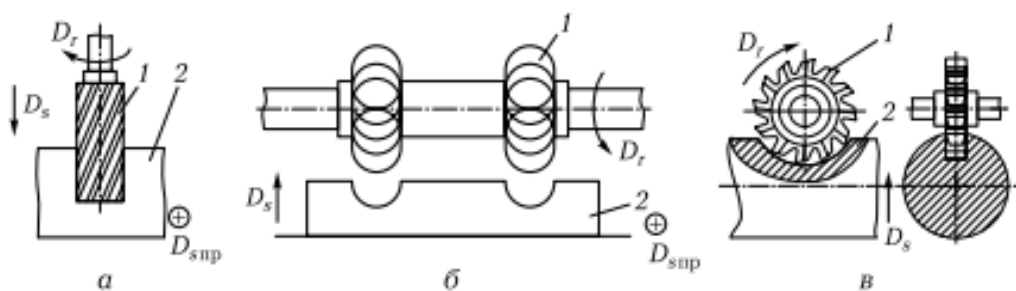


Рисунок 5. Схемы обработки пазов концевой (а), фасонной (б) и дисковой шпоночной фрезами на фрезерных станках:

1 – фреза; 2 – заготовка

Шпоночные пазы фрезеруют пазовыми дисковыми, шпоночными дисковыми или концевыми фрезами.

Фрезерование открытых шпоночных пазов с выходом канавки по окружности, радиус которой равен радиусу фрезы, производят дисковыми фрезами. Пазы, в которых не допускается выход канавки по радиусу окружности, фрезеруют концевыми или шпоночными фрезами.

Для получения точных по ширине шпоночных пазов обработку ведут на специальных шпоночно-фрезерных станках с маятниковым движением подачи (рис. 6).

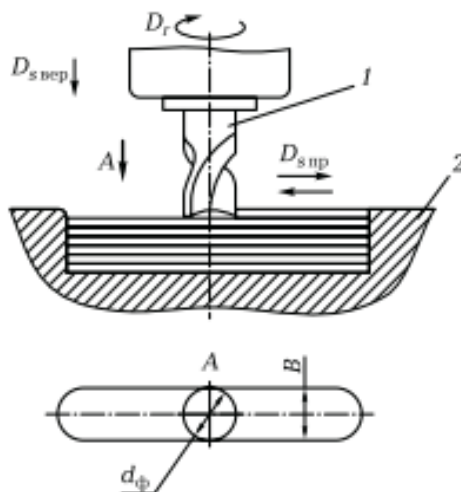


Рисунок 6. Схема обработки паза:

1 – фреза; 2 – заготовка; d_ϕ – диаметр фрезы; D_r – главное движение резания; $D_{s \text{ вер}}$ – вертикальное движение подачи; $D_{s \text{ пр}}$ – продольное движение подачи; B – ширина паза

Диаметр фрезы d_ϕ подбирается по ширине шпоночного паза B . При таком способе обработки фреза врезается в заготовку на глубину $t = 0,2 \dots 0,4$ мм и фрезерует паз по всей его длине, затем снова врезается в заготовку на такую же глубину и снова фрезерует паз по всей его длине, но в другом направлении.

Материал режущей части фрезы приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Рекомендуемые марки быстрорежущих сталей для лезвий фрез в зависимости от материалов обрабатываемых заготовок

Материалы заготовок	Марки быстрорежущих сталей
Стали: углеродистые конструкционные конструкционные легированные коррозионностойкие, жаростойкие жаропрочные	P6M5; 10P6M5; P6M3; P18; P9; P12 10P6M5; P6M5K5 P6M5K5; P9Ф2K10 P9M4K8; P18Ф2K5; P10Ф5K5
Чугуны	P6M5
Цветные сплавы алюминиевые, медные, магниевые	P6M5; 10P6M5

Таблица 2. Рекомендуемые марки твердых сплавов для лезвий фрез в зависимости от материалов обрабатываемых заготовок и характера обработки

Материалы заготовок	Марки твердых сплавов	
	для черновой обработки	для чистовой обработки
Углеродистые и легированные стали	T15K6; TT7K12; T14K8; TT20K9; T5K10; T5K12B	T30K4; T15K6; T14K8; TT8K6
Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы	T5K10; BK4; BK8; BK10M	T15K6; T14K8; T5K10
Коррозионностойкие стали аустенитного класса	T5K12B; T5K10; T14K8; TT10K8-B	T15K6; T14K8
Титан и сплавы на его основе	BK4; BK8	BK8B
Чугуны твердостью: 240HB 400 HB	BK4; BK6; BK8 BK10-OM	BK4; BK6 BK6M
Цветные металлы и их сплавы	BK4; BK6; BK5M; BK8	BK2; BK3M; BK6; BK4; BK6M
Неметаллические материалы	BK2; BK4; BK6; BK8	BK2; BK4; BK3M; BK6M

В таблице 3 приведены параметры лезвий концевых фрез.

Таблица 3. Параметры лезвий концевых фрез

Материалы заготовок	Материалы лезвий фрез	Твердость HB	Передний угол $\gamma, ^\circ$	Диаметр фрезы, d_f , мм	Задний угол $\alpha, ^\circ$	Углы на торцевых зубьях, $^\circ$		
						γ_1	α_1	φ_1
Углеродистые и легированные стали	Быстрорежущие стали	До 179	20	До 10	25	0	6	3
		179...285	15	10...20	20	0	6	3
		Свыше 285	10	Свыше 20	16	0	6	3
	Твердые сплавы	Свыше 285	- 5	10...50	20	0	6	6
Чугуны	Быстрорежущие стали	До 150	15	8...63	14	5	6	3
		Свыше 150	10	8...63	14	5	6	3
	Твердые сплавы	Свыше 150	- 5	10...50	12	0	4	3
Алюминиевые сплавы	Быстрорежущие стали	-	15	8...63	20	6	15	4

Средние значения периода стойкости фрез приведены в таблице 4.

Таблица 4. Средние значения периода стойкости фрез

Типы фрез	Диаметр фрезы, d_f , мм	Значения стойкости фрез T , мин			
		из твердых сплавов для обработки		из быстрорежущих сталей для обработки	
		сталей	чугуна	сталей (с охлаждением)	чугуна
Концевые	3...12	-	-	45	45
	14...20	90	90	60	60
	25...40	120	120	90	90
	50...63	180	120	120	120
	70...80	240	180	180	180
Дисковые	50...63	-	-	120	120
	80...100	-	-	120	150
	125...150	180	180	150	180
	200...250	240	180	180	240

Расчет силы резания при фрезеровании шпоночного паза

Глубина фрезерования t определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой, ширина фрезерования B – длину лезвия зуба фрезы, участвующую в резании (рис. 7).

При фрезеровании различают подачу на один зуб S_z , подачу на один оборот фрезы S и минутную подачу S_M , мм/мин, которые находятся в соотношении:

$$S_M = Sn = S_z zn,$$

где n – частота вращения фрезы, мин^{-1} ;

z – число зубьев фрезы.

Рекомендуемые величины подач приведены в таблице 5.

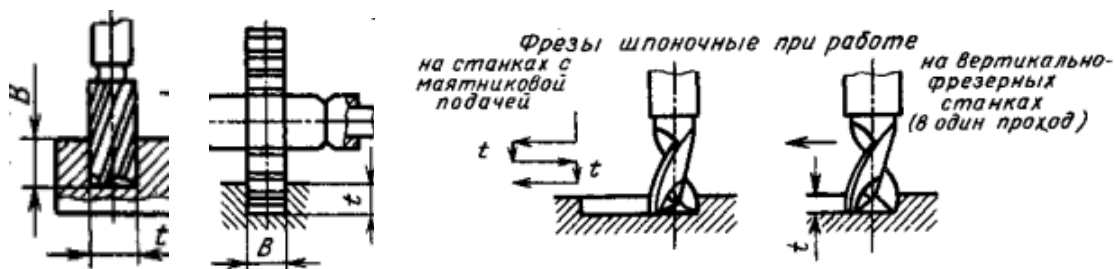


Рисунок 7. Ширина B и глубина фрезерования t при резании фрезами:
а) концевыми; б) дисковыми шпоночными; в) концевыми шпоночными

Таблица 5. Величины подач при фрезеровании стальных заготовок шпоночными фрезами из быстрорежущей стали

Диаметр фрезы D , мм	Фрезерование на шпоночно-фрезерных станках с маятниковой подачей при глубине фрезерования на один двойной ход, составляющий часть глубины шпоночного паза		Фрезерование на вертикально-фрезерных станках за один проход	
			Осевое врезание на глубину шпоночного паза	Продольное движение при фрезеровании шпоночного паза
	Глубина фрезерования t , мм	Подача на один зуб S_z , мм/зуб		
6	0,3	0,1	0,006	0,02
8		0,12	0,007	0,022
10		0,16	0,008	0,024
12		0,18	0,009	0,026
16	0,4	0,25	0,01	0,028
18		0,28	0,011	0,03
20		0,31	0,011	0,032
24		0,38	0,012	0,036
28	0,5	0,45	0,014	0,037
32		0,5	0,015	0,037
36		0,55	0,016	0,038
40		0,65	0,016	0,038

Скорость резания – окружная скорость фрезы, м/мин определяется по формуле:

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B^u z^p} K_v,$$

где C_v, q, m, x, y, u, p – коэффициент и показатели степени приведены в таблице 6;

z – число зубьев фрезы;

K_v – общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания:

$$K_v = K_{mv} K_{pv} K_{iv},$$

где K_{mv} – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (табл. 7, 8);

K_{pv} – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (табл. 9);

K_{iv} – коэффициент, учитывающий материал инструмента (табл. 10).

Таблица 6. Значения коэффициента C_v и показатели степени q, x, y, u, p, t в формуле скорости резания при фрезеровании пазов (обработка конструкционной углеродистой стали $\sigma_B = 750$ МПа)

Фрезы	Материал режущей части фрезы	Коэффициент и показатели степени							
		S_z , мм/зуб	C_v	q	x	y	u	p	t
Дисковые со вставными ножами	T15K6* ¹	<0,06 >0,06	1825 690	0,25	0,3	0,12 0,4	0,1	0	0,35
	P6M5* ²	<0,1 >0,1	75,5 48,5	0,25	0,3	0,2 0,4	0,1	0,1	0,2
Дисковые цельные	P6M5* ²	-	68,5	0,25	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2
Концевые с коронками	T15K6* ¹	-	145	0,44	0,24	0,26	0,1	0,13	0,37
Концевые с напаянными пластинами		-	234						
Концевые цельные	P6M5* ²	-	46,7	0,45	0,5	0,5	0,1	0,1	0,33
Шпоночные двухперо-вые	P6M5* ²	-	12	0,3	0,3	0,25	0	0	0,26

*¹ – без охлаждения; *² – с охлаждением.

Таблица 7. Поправочный коэффициент K_{mv} , учитывающий влияние физико-механических, свойств обрабатываемого материала на скорость резания

Обрабатываемый материал	Расчетная формула
Сталь	$K_{mv} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}$
Серый	$K_{mv} = \left(\frac{190}{HB} \right)^{n_v}$
Ковкий чугун	$K_{mv} = \left(\frac{150}{HB} \right)^{n_v}$

Примечания: 1. σ_B и HB – фактические параметры, характеризующие обрабатываемый материал, для которого рассчитывается скорость резания.

2. Коэффициент K_r и показатель степени n_v приведены в таблице 13.

Таблица 8. Значение коэффициента K_r и показатели степени n_v в формуле для расчета коэффициента обрабатываемости K_{mv}

Обрабатываемый материал	Коэффициент K_r для резцов		Показатели степени n_v при обработке резцами	
	из быстрорежущей стали	из твердого сплава	из быстрорежущей стали	из твердого сплава
Сталь: Углеродистая ($C < 0,6 \%$) $\sigma_B < 450$ МПа,	1,0	1,0	-1,0	1,0
$450 < \sigma_B < 550$ МПа	1,0	0,75	1,75	
$\sigma_B > 550$ МПа	1,0	1,0		
Повышенной и высокой обрабатываемости резанием	1,2	1,1	1,75	1,0
	0,85	0,95		
Углеродистая ($C > 0,6 \%$)	0,8	0,9	1,5	1,0
Быстрорежущие	0,6	0,7	1,25	1,0
Чугун: серый ковкий	-	-	1,7	1,25
	-	-		

Таблица 9. Поправочный коэффициент K_{nv} , учитывающий влияние состояния поверхности заготовки на скорость резания

Без корки	С коркой			
	Прокат	Поковка	Стальные и чугунные отливки	
			Нормальные	Сильно загрязненные
1,0	0,9	0,8	0,8 – 0,85	0,5 – 0,6

Таблица 10. Поправочный коэффициент K_{uv} , учитывающий влияние инструментального материала на скорость резания

Обрабатываемый материал	Значения коэффициента K_{uv} в зависимости от марки инструментального материала						
Сталь конструкционная	T5K12B 0,35	T5K10 0,65	T14K8 0,8	T15K6 1,00	T15K6T 1,15	T30K4 1,4	BK8 0,4
Сталь закаленная	HRC 35–50				HRC 51–62		
	T15K6 1,0	T30K4 1,25	BK8 0,85	BK8 0,83	BK4 1,0	BK6 0,92	BK8 0,74
Серый и ковкий чугун	BK8 0,83	BK6 1,0	BK4 1,1	BK3 1,15	BK3 1,25	-	
Медные и алюминиевые сплавы	P18, P9 1,0	BK4 2,5	BK6 2,7	9XC 0,6	XBG 0,6	Y12A 0,5	-

Сила резания – главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила, H , определяется по формуле:

$$P_z = \frac{10C_p t^x S_z^y B^{n_z}}{D^q n^w} K_{mv},$$

где n – частота вращения фрезы, мин⁻¹;

C_p, x, y, n, q, w – коэффициент и показатели степени приведены в таблице 11;

z – количество зубьев фрезы;

K_{mp} – поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала при обработке конструкционной углеродистой стали рассчитывается по формуле:

$$K_{mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right)^{0,3}.$$

Таблица 11. Значения коэффициента C_v и показатели степени, x, y, u, q, w в формуле окружной силы P_z при фрезеровании пазов (обработка конструкционной углеродистой стали $\sigma_B = 750$ МПа)

Фрезы	Материал режущей части фрезы	Коэффициент и показатели степени					
		C_p	x	y	u	q	w
Дисковые, прорезные и отрезные	Твердый сплав	261	0,9	0,8	1,1	1,1	0,1
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Концевые	Твердый сплав	12,5	0,85	0,75	1,0	0,73	- 0,13
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0

При фрезеровании шпоночных пазов шпоночными концевыми фрезами рекомендуется следующий режим резания: подача на зуб $S_z = 0,02 \dots 0,04$ мм/зуб, скорость резания $v = 15 \dots 20$ м/мин; а при использовании дисковых пазовых фрез – $S_z = 0,03 \dots 0,06$ мм/зуб, скорость резания $v = 25 \dots 40$ м/мин.

Рекомендуется по выбранной скорости резания определить частоту вращения шпинделя станка (фрезы) по формуле:

$$n = \frac{1000v}{\pi d_\phi}.$$

Расчетное значение n округлить до ближайшего меньшего значения по паспорту фрезерного станка и по нему определить фактическое значение скорости резания.

Значение эффективной мощности резания $N_{эф}$ при фрезеровании шпоночного паза не должно превышать мощность электродвигателя N_d привода главного движения выбранного станка:

$$\frac{N_{эф}}{\eta_{к.с.}} = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} \leq N_d, \text{ (кВт)},$$

где $\eta_{к.с.} = 0,75 \dots 0,85$ – коэффициент полезного действия коробки скоростей фрезерного станка.

Силы закрепления заготовки в призме

Качественное фрезерование шпоночного паза требует не только точности базирования, но и адекватного закрепления, способного противостоять силам резания. К обрабатываемой заготовке приложены силы, возникающие в процессе обработки, силы зажима и реакции опор (рис. 8).

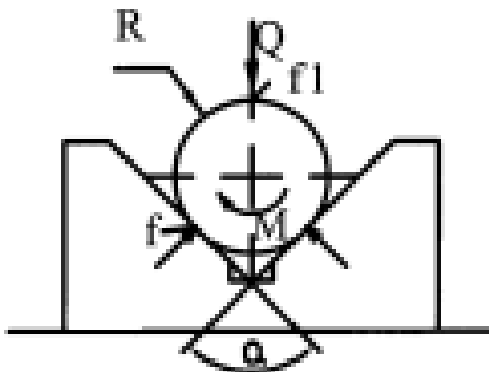


Рисунок 8. Схема приложения сил для определения усилия закрепления

Источником возникновения моментов сил могут являться не только моменты резания, но и моменты, сдвигающие заготовку относительно установочных элементов под действием, например, осевой силы и т. п.

Фрезерование шпоночных пазов на валах чаще всего производится в призмах при различных их расположениях. В этом случае возникает необходимость расчета силы закрепления Q по условию поворота заготовки относительно ее оси и осевого смещения вдоль оси.

Силу закрепления Q без учета трения на торце можно найти из равенства:

$$Q = \frac{kM}{f_1 r + f \frac{r}{\sin \frac{\alpha}{2}}},$$

где k – коэффициент запаса зажима;

M – момент резания, определяется касательной составляющей силы резания P_z , действующей на заготовку, и ее плечом – радиусом обрабатываемой поверхности (более точно – средним радиусом между обрабатываемой и обработанной поверхностью);

r – радиус заготовки, мм;

$f_1 = 0,2$ – коэффициент трения при контакте поверхности заготовки с прихватом;

$f = 0,16$ – коэффициент трения при контакте обработанной поверхности заготовки с установочными поверхностями призмы.

Коэффициент запаса зажима k , учитывающий нестабильность силовых воздействий на заготовку для обеспечения надежного закрепления, определяют по формуле:

$$k = k_0 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6,$$

где k_0 – гарантированный коэффициент запаса, не может быть меньше 1,5;

$k_1 = 1$ – коэффициент, учитывающий изменение припуска;

$k_2 = 1,4$ – коэффициент, учитывающий повышение силы резания вследствие износа инструмента;

$k_3 = 1,3$ – коэффициент, учитывающий повышение силы резания при прерывистом резании;

$k_4 = 1$ – коэффициент, учитывающий постоянство сил зажима;

$k_5 = 1$ – коэффициент, характеризующий только зажимные механизмы с ручным приводом;

$k_6 = 1$ – коэффициент, учитывающий наличие момента, стремящегося повернуть заготовку.

Если в результате расчета оказалось, что $k < 2,5$, принимаем его равным 2,5.

Если заготовка сдвигается под действием осевой силы P вдоль призмы, то

$$Q = \frac{kP}{f_1' + f' \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}}.$$

В качестве силы P , от действия которой возникает крутящий момент и осевое смещение заготовки, необходимо принимать сумму составляющих сил резания, действующих на заготовку, P_y и P_z .

После определения погрешности закрепления и расчета суммарной погрешности установки следует произвести сравнение этой погрешности с допуском на глубину паза h (h_1 , h_2 или h_3 по заданию). Если величина погрешности установки составляет незначительную величину от допуска исходного размера, следовательно, можно применить выбранный способ установки заготовки при фрезеровании паза.

Задание

Определить возможность установки гладкого вала (материал заготовки – Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) на неподвижную призму с углом $\alpha = 60^\circ$; ($\alpha = 90^\circ$; $\alpha = 120^\circ$; $\alpha = 180^\circ$) при фрезеровании паза, если нужно выдержать размер $h_2 = 54,5_{-0,2}$; ($h_1 = 5,5^{+0,2}$; $h_3 = 24,5 \pm 0,1$) (рис. 9).

Диаметр базовой поверхности: $D = 60d11 (60_{-0,290}^{+0,100})$.

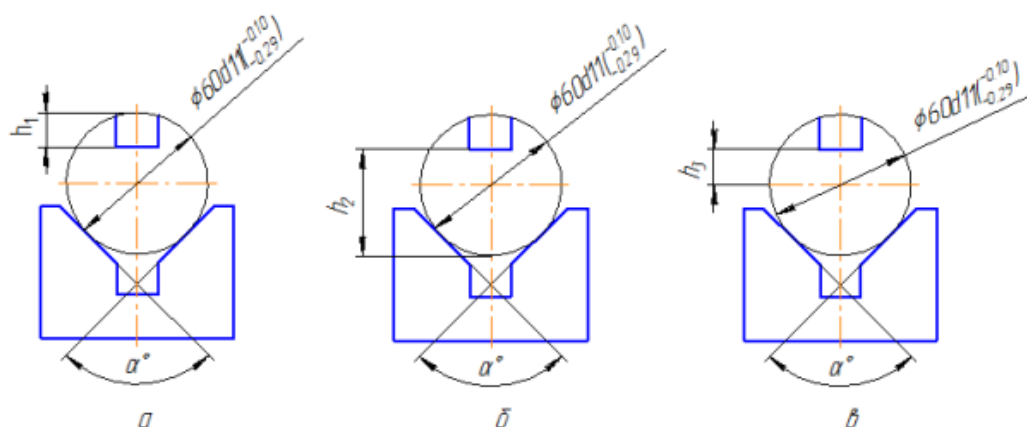


Рисунок 9. Установка цилиндрической детали в призму для обработки шпоночного паза (три способа задания глубины шпоночного паза: а) от верхней образующей; б) от нижней образующей; в) от оси вала

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучите теоретические разделы данной работы о причинах возникновения погрешности установки заготовки на станке.
2. Получите индивидуальное задание от преподавателя.
3. Определите погрешность базирования вала при установке на призму фрезерного станка.
4. Произведите расчет силы резания при фрезеровании шпоночного паза и силы закрепления заготовки в призме.
5. Определите погрешность закрепления вала при установке на призму фрезерного станка.
6. Произведите сравнение полученного значения погрешности установки с допускаемым значением.
7. Составьте отчет по работе.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

- название лабораторной работы, цель и задачи работы;
- краткие теоретические сведения о базировании, погрешностях установки;
- схемы для расчета погрешностей базирования и закрепления;
- расчеты погрешностей базирования и закрепления, силы резания при фрезеровании шпоночного паза и силы закрепления заготовки в призме;
- вывод о возможности установки вала на призму при фрезеровании шпоночного паза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21495–76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения.– М.: Издательство стандартов, 1976. – 35 с.
2. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник для вузов / А. А. Маталин. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 512 с.
3. Михайлов, А. В. Базирование и технологические базы / А. В. Михайлов. – Тольятти : ТолПИ, 1994. – 30 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – 656 с.
5. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. – М. : Машиностроение, 1984. – 592 с.
6. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов : учебное пособие для вузов / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 352 с.
7. Шишкин, В. П. Основы проектирования станочных приспособлений. Теория и задачи: учебное пособие / В. П. Шишкин, В. В. Закураев; под ред. А. Е. Беяева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 288 с.