

## **Лекция №3**

# **Металлорежущие станки**

Расчет и конструирование структурных компонентов  
металлорежущих станков

**1 Введение**

**2 Влияние статических нагрузок**

**3 Влияние динамических нагрузок**

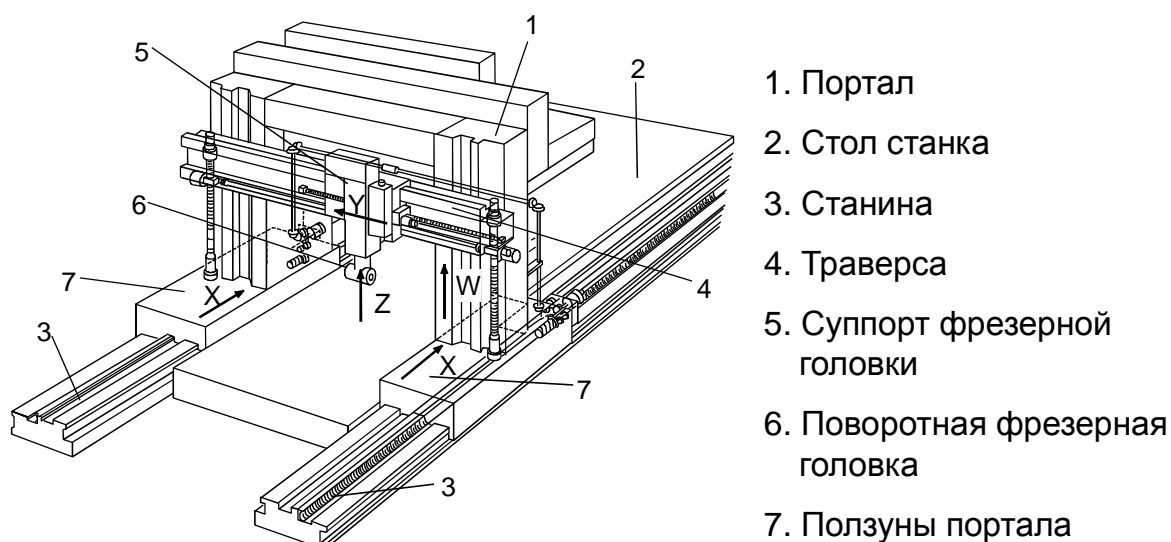
**4 Влияние температур**

**5 Заключение**



Источник: Deckel

Рис. 3-1: Типичные структурные компоненты обрабатывающего центра



Источник: Waldrich-Coburg

Рис. 3-2: Типичные структурные компоненты портального Обраб. Центра

Структурными компонентами станка называются детали и узлы, воспринимающие усилия резания и генерирующие формообразующие движения рабочих органов станка. Конструктивное исполнение структурных компонентов и рабочих органов, таких как главные шпиндели, двигатели, ползуны, суппорты и коробки скоростей, определяется характерным технологическим процессом изготовления детали на данном станке. В особенности на выбор конструкции оказывает воздействие форма заготовки, а также параметры точности и производительности, которые, в свою очередь, определяют необходимый уровень жесткости станка. В процессе конструирования должны приниматься во внимание аспекты удобства сборки и ремонта станка.

Компоновка станков включает большое количество отдельных компонентов, которые составляют единую структуру. Для соединения отдельных деталей применяются резьбовые или, реже, клеевые соединения. К структурным компонентам принято относить станины, колонны, столы, консоли, траверсы и иные подобные компоненты. На Рис. 3-1 и Рис. 3-2 показаны примеры структурных компонентов обрабатывающего центра и портального фрезерного станка.

Параметр	Единица изм.	Сталь	Чугун <sup>1)</sup>			ПБ <sup>2), 3)</sup>
			EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	
Плотность $\rho$	кг/дм <sup>3</sup>	7,8	7,15	7,2	7,3	2,1-2,4
Модуль упругости E	кН/мм <sup>2</sup>	210	88-113	103-118	123-143	15-55
Плотность, приведенная к модулю упругости	10 <sup>6</sup> М <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	27	14,0	15,4	18,2	15
Предел прочности на растяжении $R_m$	кН/мм <sup>2</sup>	0,35-1,5	0,2-0,3	0,25-0,35	0,35-0,45	0,01-0,03
Предел текучести $R_p$	кН/мм <sup>2</sup>	0,25	0,13-0,195	0,165-0,228	0,228-0,285	0,002
Демпфирование материала (лог. декр.)	10 <sup>3</sup> кг/мс	0,002 <sup>4)</sup>	0,003 <sup>4)</sup>	0,003 <sup>4)</sup>	0,003 <sup>4)</sup>	0,02-0,04 <sup>4)</sup>
Коэф. термического расширения $\alpha$	мкм/мК	12	10-13	10-13	10-13	10-20
Теплопроводность $\lambda$	Вт/мК	45-50	50-46	48,5-44,5	45,5-41,5	1,3-3,0
Теплоемкость $C_p$	кДж/кгК	0,45-0,5	0,46-0,535	0,46-0,535	0,46-0,535	0,9-1,3
Стоимость	EUR/дм <sup>3</sup>	8	5	5	5	2,5
Энергоемкость	МДж/дм <sup>3</sup>	160	120	120	120	25

1) Ferrocast (R)  
Тех. требования Nr. 1600/3

2) ПБ  
Полимербетон

3) Зависит от содержания  
смоли и камня

4) Источник: "Mineralguss ABC  
ACO Severin Ahlmann GmbH

**Рис. 3-3: Сравнительная характеристика конструкционных материалов**

Для изготовления корпусных элементов станков, в основном, применяются сталь, чугун и полимербетон. Каждый из названных конструкционных материалов имеет преимущества и недостатки с точки зрения применения в структурах станков. Выбор в пользу того или иного конструкционного материала производится на основе анализа технологических требований и расчета сил резания при обработке.

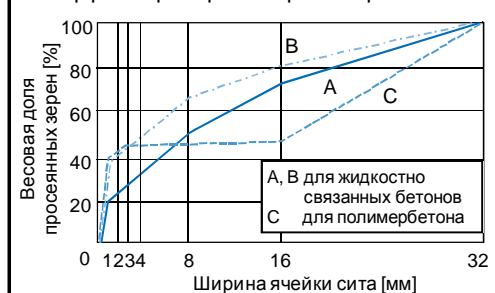
Важнейшие характеристики распространенных конструкционных материалов для изготовления конструктивных компонентов представлены в таблице на Рис. 3-3. Наилучшими механическими свойствами обладает сталь. Однако ее стоимость и энергоемкость являются самыми высокими по сравнению с другими представленными материалами. Механические свойства чугуна несколько хуже, чем у стали, но и стоимость значительно ниже. Важной характеристикой полимербетона, обуславливающей дополнительные требования к технологии изготовления конструктивных компонентов из данного материала, является предел текучести. При нагружении полимербетона силой, вызывающей напряжения в материале выше предела текучести, бетон разрушается или пластически деформируется. Уровень данного напряжения, в сравнении с прочими представленными материалами, относительно низкий. Применительно к станочным структурам, данная характеристика имеет значение лишь в зонах приложения сил. Поскольку расчет структурных компонентов станков ведется на жесткость, а не на прочность, предел текучести материала может быть достигнут лишь в зонах наложения или передачи нагрузок. Решение данной проблемы заключается в установке стальных элементов в компоненты из полимербетона в зонах, в которых действуют значительные гравитационные силы и силы резания, для обеспечения рассеивания этих сил в большем объеме материала. Для дополнительного улучшения механических свойств полимербетона может применяться высокочастотная коротковолновая обработка или термообработка для достижения полной полимеризации реактивных полимеров. В сравнении со сталью и чугуном, уровень демпфирования полимербетона значительно выше, что позволяет повысить общий уровень динамической жесткости структуры станка.

## Свойства искусственных смол как связующих веществ

	Полиэстер. смолы	Эпоксид. смолы	Метакрилат. ные смолы
Механизм твердения	Полимеризация	Полиаддитивация	Полимеризация
Предел прочности на растяжение [Н/мм <sup>2</sup> ]	20-70	35-70	20-100
Предел прочности на сжатие [Н/мм <sup>2</sup> ]	20-70	85-200	70-200
Модуль упругости [кН/мм <sup>2</sup> ]	3-5	2-7	2,8-4,5
Относит. удлинение при разрушении %	1,5-300	1,5-300	1,5-300
Плотность г/см <sup>3</sup>	1,2-1,8	1,3-1,8	1,7
Коэффициент температурн. расширения [мкм/м град]	20-40	40-90	30-40

## Наполнители: кварц, щебень, базальт, гранит

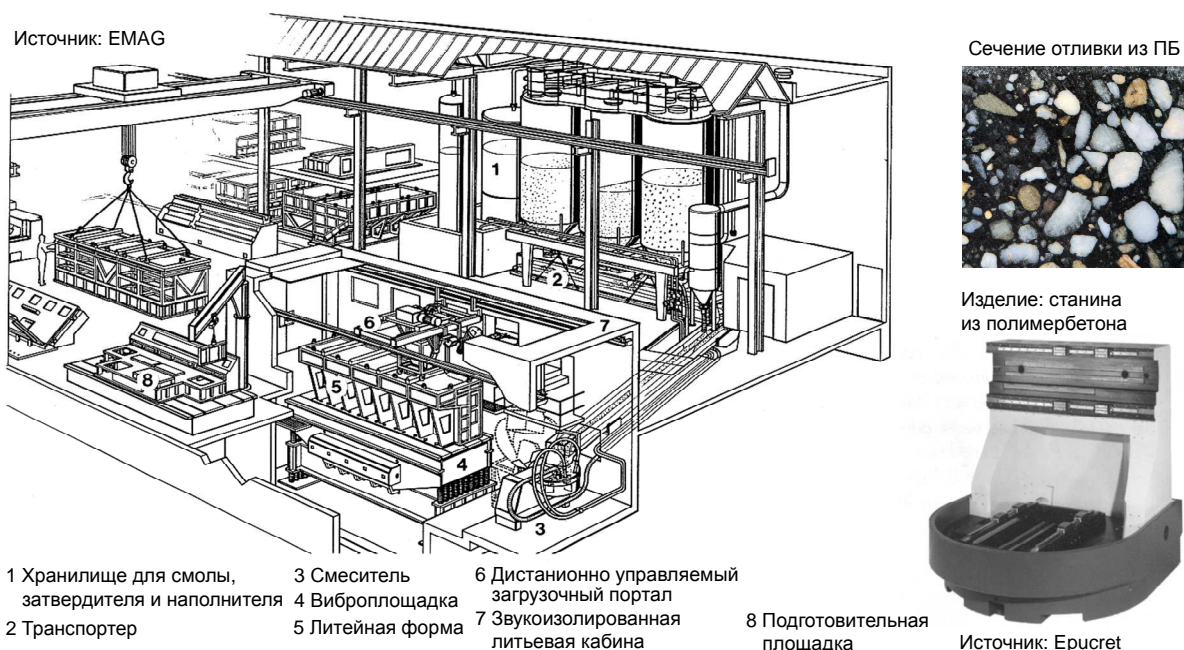
## Выбор размера зерна по кривой просеивания



Размерный класс наполнителя	Массовая доля наполнителя по кривым просеивания		
	A	B	C
0-1	20	35	35
1-2	5	5	5
2-3	5	5	5
3-4	5	5	-
4-8	15	20	-
8-16	20	15	-
16-32	30	15	55

Рис. 3-4: Полимербетон – наполнители и связующие вещества

Полимербетон состоит из наполнителя и реактивных полимеров, играющих роль связующих веществ. Для производства полимербетона применяются метакриловые смолы, ненасыщенные полиэфирные смолы, а также эпоксидные смолы. Массовая доля связки составляет от 6% до 20%. Основные характеристики реактивных полимеров представлены в таблице на Рис. 3-4. Данные параметры определяются производителем с помощью различных методов испытаний. В качестве наполнителей используются измельченный гранит и кварц с различным размером зерен. Кроме того находят применение базальт, слюда и тяжелый шпат. Полученный смешением названных компонентов материал отличается коррозионной стойкостью к большинству агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи и СОЖ. Тип и массовая доля реактивного полимера, а также вид и размер зерен наполнителя определяют характеристики полимербетона. При производстве полимербетона с применением эпоксидной смолы массовая доля связки должна быть минимальной. Это достигается высокой плотностью наполнителя из измельченного камня. Обрабатываемость связующего полимера, а также размер и форма частиц наполнителя оказывают решающее воздействие на плотность наполнения формы и адгезию между связкой и наполнителем. Данные параметры определяют механические свойства конструкционного материала после затвердевания.



**Рис. 3-5: Установка для производства изделий из полимербетона**

Для производства деталей из полимербетона жидкая смесь наполнителя и связующего вещества заливается в форму и трамбуется виброуплотнителем. При уплотнении содержащийся в смеси воздух, а также реактивный полимер, поднимаются в верхний слой смеси. Данный процесс позволяет достичь высокой плотности заполнения формы каменной крошкой и неизменности характеристик материала в сечении. Литевая форма придает жидкому аморфному полимербетону вид готовой детали. При соответствующей конструктивной проработке формы достигается высокая геометрическая точность получаемой заготовки из полимербетона, точное расположение заранее установленных элементов, а также достаточная заполняемость формы и плотность смеси. В процессе уплотнения на литейную форму действуют силы тяжести, пропорциональные весу жидкого бетона, а также инерционные силы наложенных колебаний. Для сохранения геометрической точности заготовки литейная форма должна обладать высокой статической и динамической жесткостью. Обычно высокая жесткость достигается применением ребер жесткости в конструкции формы. Материалом для изготовления формы может служить сталь, алюминий, дерево, композитные материалы на основе углерода, поливинилхлорид, силикон и полиамид. Стальные и алюминиевые формы позволяют получать отливки с точностью 0,1 мм/м, а то время как с помощью деревянных форм обычно достигается точность в пределах 1 мм/м.

Выполнение специальных требований при проектировании литейных форм для полимербетона позволяет добиться полного заполнения формы смесью точно по контуру. Прежде всего, необходимо принять во внимание, что максимальный размер зерна наполнителя должен быть меньше  $1/3$  минимальной толщины стенки заготовки. Это позволит избежать образования пробок и раковин. Далее следует учитывать, что полимербетон в жидком состоянии ведет себя не как жидкость, а как каменная крошка или щебень. При переливании бетона в плоскости образуется конус с углом при вершине около  $150^\circ$ . Это так называемый угол насыпного конуса. Наложение колебаний вызывает сцепление частиц бетона, что снижает его текучесть. Выраженность такого поведения зависит от массовой доли связующего полимера и размеров литейной формы. Особенно ярко выражено оно при низком содержании связки и малых размерах формы. Исходя из этого, следующие требования должны быть выполнены при изготовлении литейных форм. Во-первых, сечение формы не может меняться скачкообразно. При изменении размеров сечения должны применяться наклонные или конусные поверхности. Устанавливаемые в литейную форму фасонные стержни, впоследствии заливаемые бетоном, также должны иметь

наклонные или конусные поверхности. В связи с высокой адгезией полимербетона стенки формы должны быть защищены специальным разделителем. На гладких и твердых поверхностях формы процесс отделения формы и заготовки протекает особенно благоприятно. Шероховатые поверхности адгезируют к полимербетону сильнее, вследствие чего для разделения необходимо приложить значительное усилие, которое ведет к ускоренному износу форм и появлению сколов на поверхности заготовки.

В процессе уплотнения слой разделительного материала на податливых поверхностях может деформироваться под действием полимербетона. В зонах повреждения целостности защитного слоя возникают локальные склеивания, ведущие к износу формы.

Стальные и алюминиевые формы пригодны для производства тысяч отливок. Окрашенные и покрытые защитным слоем из пластмассы деревянные формы пригодны для производства, в среднем, не более чем 50 отливок. Износостойкость деревянных форм может быть повышена за счет установки металлических пластин на внутреннюю сторону формы. Дополнительные детали, которые требуются в готовой отливке, например дюбели, трубы и соединительные пластины устанавливаются в литейную форму и закрепляются перед заливкой полимербетона. Закрепление должно быть надежным и выдерживать нагрузки при вибрации и контакте с бетоном без перемещения установленной детали. Таким же образом устанавливаются разгрузочные стержни, например, из листового материала или полиуретановой пены для снижения веса заготовки. Устанавливаемые в форму детали склеиваются с полимербетоном, для чего их поверхности обрабатываются механически (грубое шлифование или пескоструйка) для повышения шероховатости поверхности. Элементы шероховатости геометрически замыкаются с частицами бетона, что повышает силу сцепления. При более поздней установке элементов в затвердевшую отливку необходимо подготовка посадочной поверхности – механическая обработка и обработка химическим реактивом.

Конструкция формы должна предусматривать элементы для отвода воздуха из смеси при заливке. Кроме того, допуски размеров и формы поверхности отливки со стороны заливки полимербетона должны быть наибольшими.

Вспомогательные конструкторские средства для оценки технических характеристик различных конструкций	Точность и производительность					Безопасность и охрана окр. среды			
	Геометрич. и кинематич. точность станка без нагрузки	Статика	Динамика	Температ. поля	Прочность	Уровень шума	Вибрации	Безопасность	Эргономика
САПР: Расчет конструкции Контроль расчетов Оптимизация Моделирование									
Проведение измерений для: Создания моделей Исследования прототипов Серийного контроля									
Каталоги принципиальных решений задач по созданию технологичных конструкций. Каталоги конструкций									
Критерии и способы оценки Уровень развития науки и техники (ТУ, стандарты, законы)									

Наличие средства:    отсутствует В избытке

Рис. 3-6: Вспомогательные средства для расчета и конструирования

На Рис. 3-6 в столбцах таблицы представлены основные критерии оценки технических характеристик станков. Точность и производительность станков в большой степени определяется кинематической точностью, статической и динамической жесткостью, а также термоэластичными показателями. С точки зрения маркетинга, важными являются также эргономические характеристики, влияющие на безопасность труда. К ним относятся, в первую очередь, уровень шума и вибраций при обработке.

Вспомогательные средства, доступные инженеру для оценки технических параметров станков, приведены в строках таблицы на Рис. 3-6. В клетках, образуемых пересечением строк и столбцов, указана доступность того или иного метода оценки для соответствующего параметра. Приведенные в таблице вспомогательные средства находят все более широкое применение в процессе конструирования станков. В особенности в станкостроении, являющимся одной из важнейших отраслей германской промышленности, применение современных средств технической разработки и конструирования является неотъемлемым элементом высокой конкурентоспособности. В настоящее время ситуация на рынке требует высокой гибкости в номенклатуре выпускаемой продукции. При этом себестоимость реализации того или иного инженерного решения часто играет решающую роль в рыночном успехе продукта.



**1 Введение**

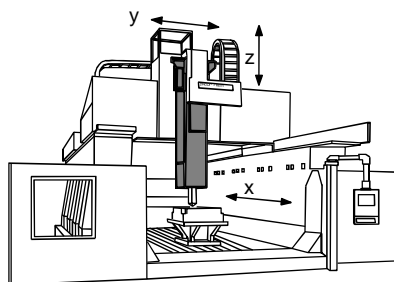
**2 Влияние статических нагрузок**

**3 Влияние динамических нагрузок**

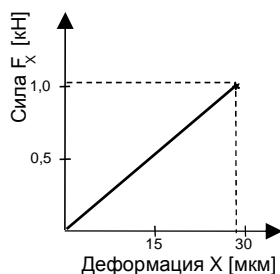
**4 Влияние температур**

**5 Заключение**

Портальный фрезерный обрабатывающий центр



Кривая статической деформации



Деформация КЭ-модели ползуна под действием статической силы

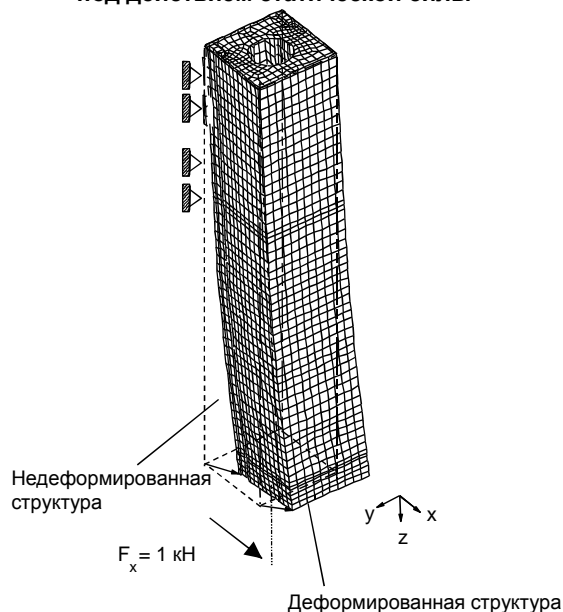


Рис. 3-7: Статическая деформация ползуна по оси z портального ОЦ

Под действием силы резания в процессе обработки, а также силы тяжести, структуры станков подвергаются статическому нагружению. В зависимости от конкретной технологической задачи, величина и направление сил и моментов, а также расположением точки приложения силы меняются. Вследствие этого величина статической деформации компонентов станка также меняется, что вызывает различное смещение центра инструмента (TCP – Tool Center Point). На Рис. 3-7 показан типичный вид статической деформации ползуна по оси z портального фрезерного станка под действием статической силы. Смещение центра инструмента под действием статических сил вызывает отклонение размеров и формы обработанных деталей. Таким образом, достаточно высокая статическая жесткость структуры является необходимым условием для соблюдения требуемого допуска на отклонение размеров и формы деталей, обрабатываемых на металлорежущих станках, а также оборудовании для обработки металлов давлением.

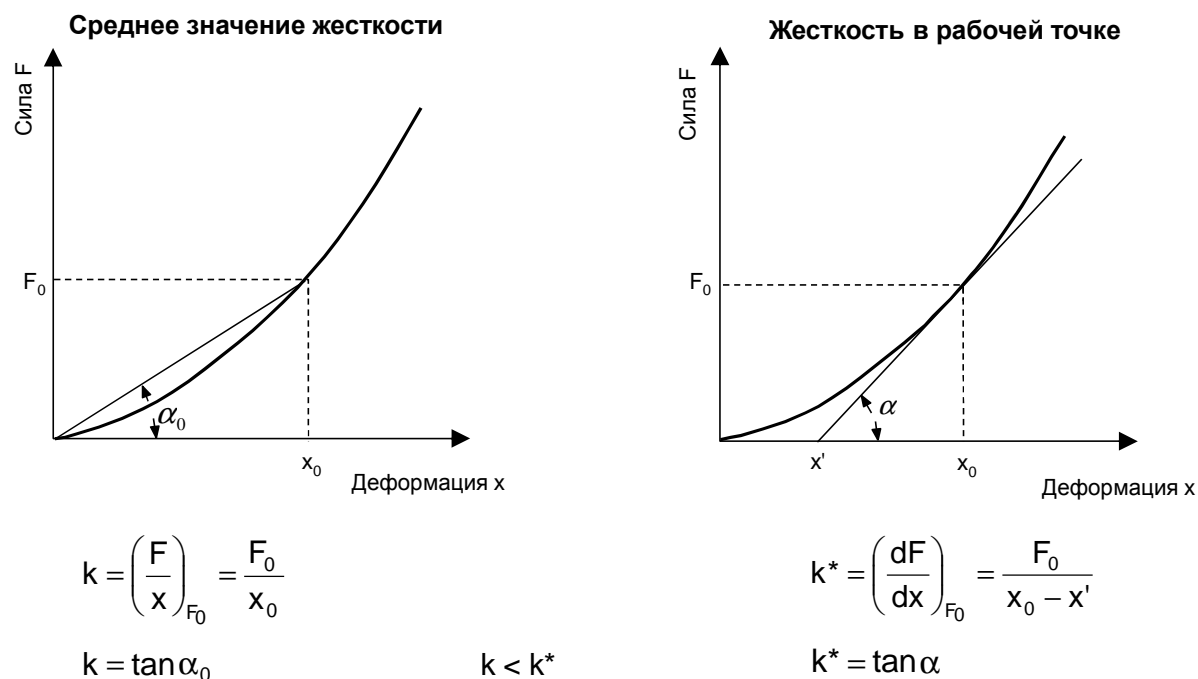


Рис. 3-8: Определение жесткости по кривой статической деформации

Статическая жесткость станков, сборочных узлов или отдельных деталей определяется величиной их упругих деформаций под действием нагрузок постоянной величины. Параметром, описывающим поведение структуры под действием статических сил, является жесткость или ее обратная величина - податливость. Зависимость перемещения  $x$  от силы  $F_x$  графически представляется в виде кривой жесткости. Идеальная линейная характеристика присуща только монолитным структурам. Часто кривые жесткости структур станков и сборочных узлов проявляют нелинейное прогрессивное поведение, при котором с увеличением величины статической силы постоянному приращению силы соответствуют все меньшее приращение перемещения. Прогрессивное увеличение жесткости возникает, прежде всего, вследствие роста площади контакта в соединениях. Определение жесткости в произвольной точке кривой определяется двумя способами. При первом (Рис. 3-8, слева) жесткость определяется по наклону секущей, проведенной из нулевой точки к рассматриваемой точке кривой. Данный метод применяется тогда, когда достаточно определить величину средней жесткости для заданной величины нагрузки ( $0 < F < F_0$ ). При применении второго способа (Рис. 3-8, справа) величина жесткости определяется как наклон касательной к кривой жесткости в рассматриваемой точке. С помощью этого способа возможно определить величину перемещения в системе с преднатягом посредством силы  $F_0$ , которое возникло вследствие действия дополнительной силы (например, при динамическом нагружении станка, на который уже действует статическая сила). Для прогрессивных жесткостных характеристик  $k$ , в общем случае, меньше  $k^*$  (Рис. 3-8).

Податливость  $g$  представляет собой обратное значение жесткости и рассчитывается как отношение деформации  $x$  к силе  $F$ . Жесткость и, соответственно, податливость структурных компонентов станков определяется видом конструкционного материала, геометрией, а также видом, расположением и направлением действия силы. Расчет на статическую жесткость должен проводиться только для целостной системы, включающей все элементы и узлы. Целью расчета является уменьшение относительного перемещения между центром инструмента и заготовкой под действием статической нагрузки.

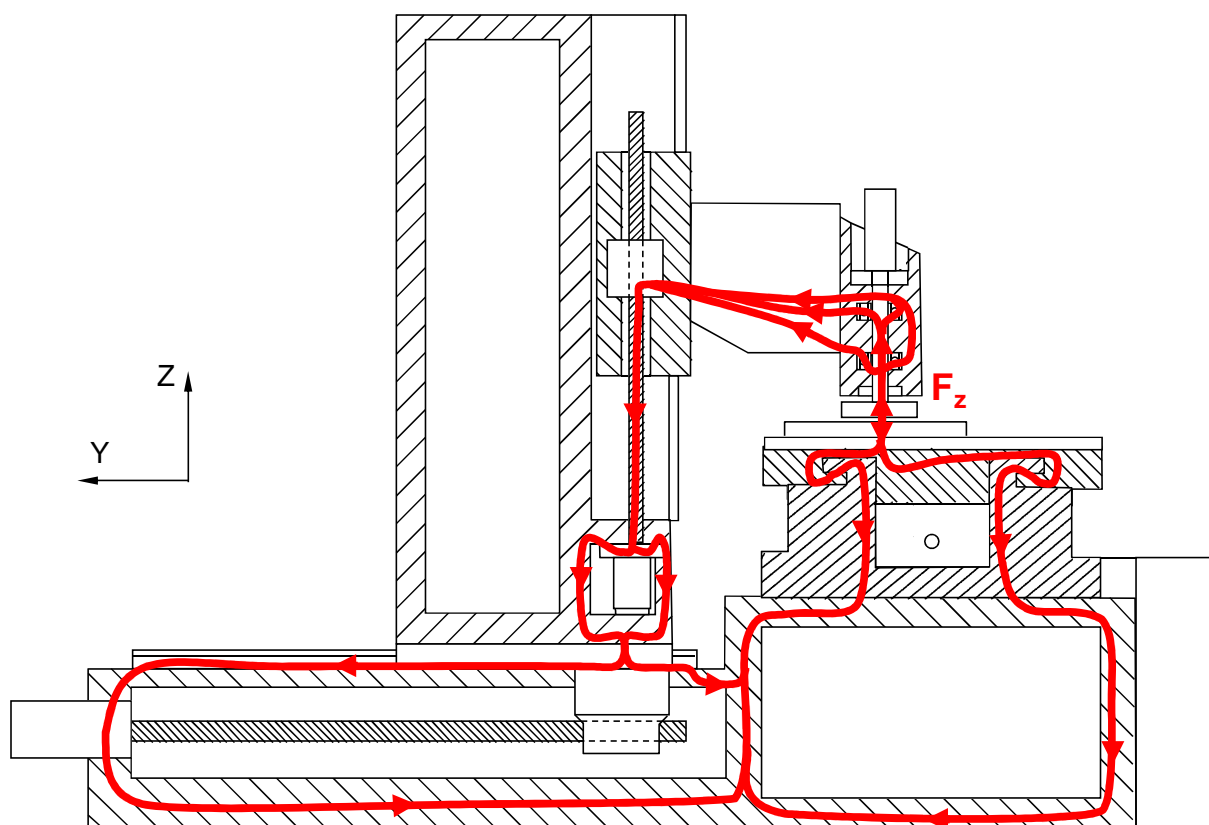


Рис. 3-9: Распределение потока силы резания по оси  $Z$  в структуре станка

Силы резания, возникающие в зоне контакта между инструментом и заготовкой, вызывают деформацию структуры станка, суммарная величина которой складывается из величин деформаций отдельных компонентов, находящихся в потоке сил. Величину деформации каждого компонента или соединения можно установить путем измерения относительных перемещений между прилегающими компонентами станка. На Рис. 3-9 схематично представлен поток сил в вертикальном фрезерном станке как следствие действия составляющей силы резания по оси  $z$ . Очевидно, что требуемая жесткость структуры станка может быть достигнута только при достаточной жесткости всех лежащих в потоке сил компонентов – подшипников, шпинделя и направляющих. Упрощенно компоненты станка могут рассматриваться как последовательно соединенные пружины, суммарная податливость которых складывается из податливости отдельных компонентов и соединений.

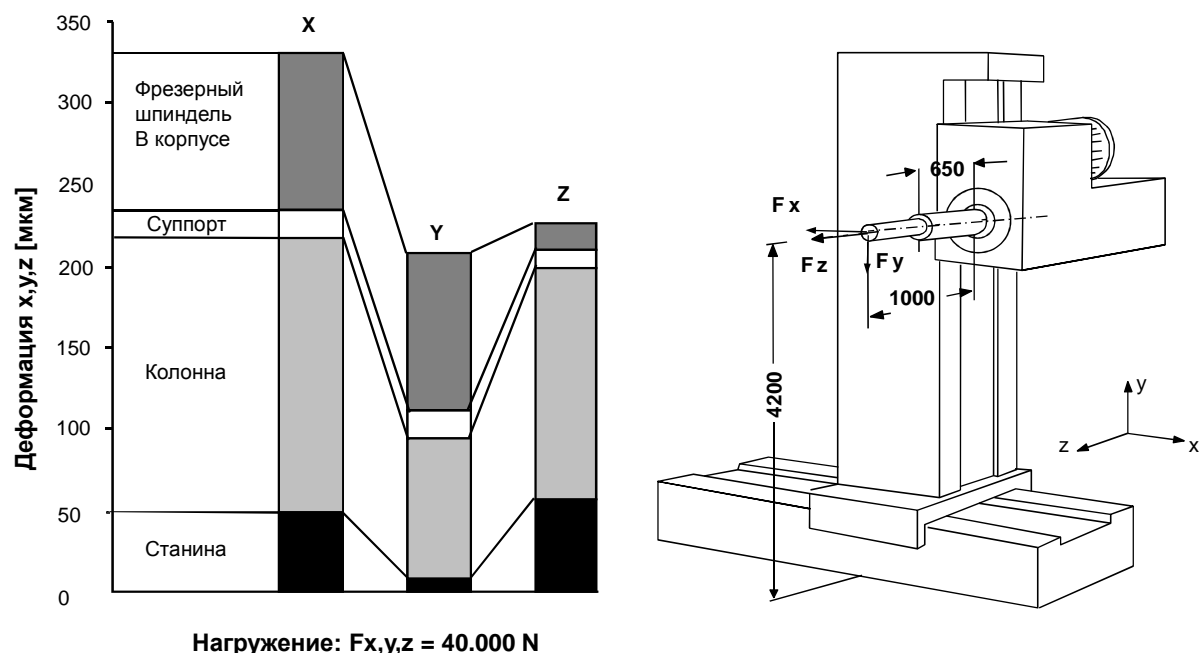


Рис. 3-10: Анализ деформации горизонтально-расточного станка

Пример анализа статической деформации структуры горизонтально-расточного станка показан на Рис. 3-10. Для проведения анализа шпиндель станка нагружается статической силой 40.000 Н поочередно по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . В левой части рисунка приведен график, показывающий величину деформации каждого компонента и ее долю в общей деформации станка. Фрезерный шпиндель и корпус шпинделя при наложении силы по оси  $x$  и  $y$  нагружаются на изгиб. При нагружении по оси  $z$  – на сжатие. Вследствие этого податливость данной пары компонентов по осям  $x$  и  $y$  значительно выше, чем по оси  $z$ . Жесткость суппорта по всем трем осям практически одинакова. Податливость колонны и станины, напротив, сильно различается в зависимости от направления действия силы. Силы  $F_x$  и  $F_z$  вызывают деформации изгиба и кручения колонны. Из-за довольно большого плеча силы, наложенной на конце шпинделя по оси  $x$ , крутильные нагрузки вызывают наибольшую деформацию колонны. При наложении силы по оси  $y$  колонна нагружается на изгиб и растяжение. Деформация станины также зависит от направления действия силы, т.к. плечи сил по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  различны.

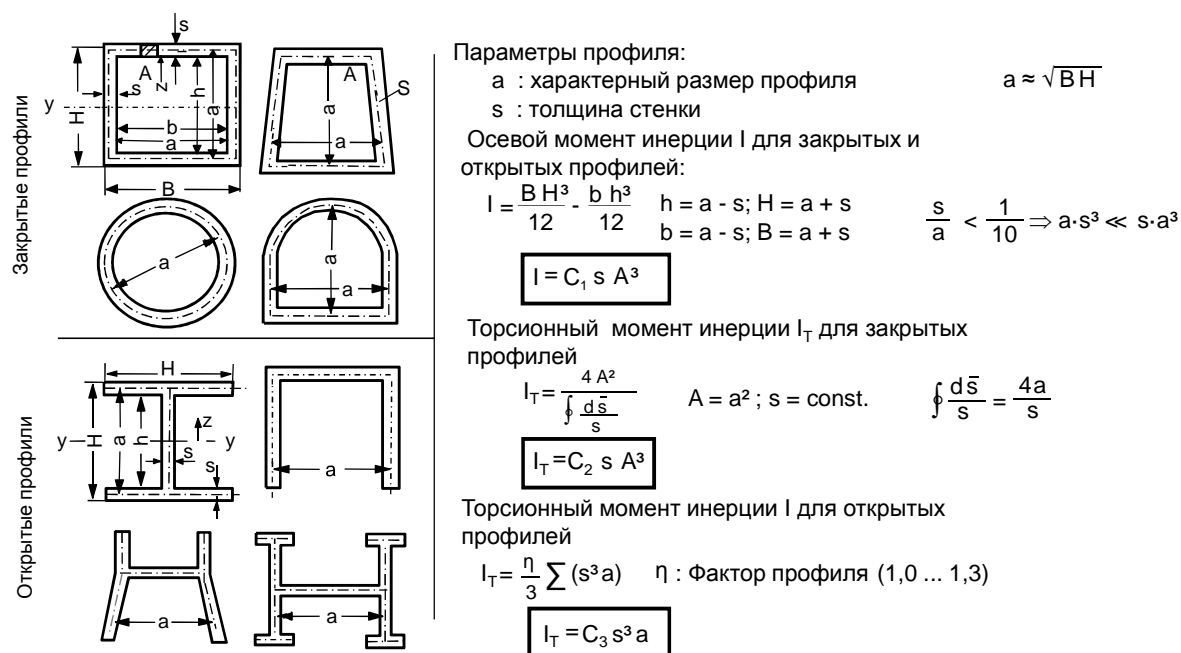


Рис. 3-11: Формы сечений и формулы расчета геометрических моментов инерции

На Рис. 3-11 представлены формулы для расчета осевого момента инерции сечений важнейших конструктивных профилей. Расчет ведется по характерным размерам профиля  $a$  и толщине стенки  $s$ . Параметр  $a$  является ориентировочной величиной для сечений различной формы, представленных на Рис. 3-11.

При расчете торсионного момента инерции различают закрытые и открытые профили. Сравнение формул показывает, что для закрытых профилей толщина стенки учитывается линейно, а размер сечения по степенной функции третьего порядка. Для открытых профилей зависимость прямо противоположная: толщина стенки - в третьей степени, а размер сечения - линейно.

$$a \approx \sqrt{B \cdot H}$$

Формулы для расчета жесткости	C : Константа, учитывающая влияние всех формульных коэффициентов	↑ Положительное возд. ↓ Отрицательное возд.	Форма	Материал		
Изгиб	Открытые и закрытые сечения	$k_B = \frac{F}{f_B} = C E \frac{s a^3}{L^3}$	$a^3 \uparrow$	$s \uparrow$	$L^3 \downarrow$	$E \uparrow$
Сдвиг	Открытые и закрытые сечения	$k_Q = \frac{F}{f_Q} = C G \frac{s a}{L}$	$a \uparrow$	$s \uparrow$	$L \downarrow$	$G \uparrow$
Кручение	Закрытые сечения	$k_T = \frac{M_T}{\phi} = C G \frac{s a^3}{L}$	$a^3 \uparrow$	$s \uparrow$	$L \downarrow$	$G \uparrow$
	Открытые сечения	$k_T = \frac{M_T}{\phi} = C G \frac{s^3 a}{L}$	$a \uparrow$	$s^3 \uparrow$	$L \downarrow$	$G \uparrow$

Рис. 3-12: Влияние различных конструктивных параметров на жесткость

На Рис. 3-12 представлен анализ изменения жесткости деталей при увеличении различных конструктивных параметров деталей. Увеличение длины заготовки, стоящей в знаменателе формулы для расчета жесткости, ведет к снижению жесткости. В таблице на Рис. 3-12 в соответствующей клетке показана стрелка, указывающая вниз, что означает уменьшение жесткости при увеличении длины профиля. Увеличение других параметров, напротив, повышает жесткость профиля, что отражается направленными вверх стрелками. Параметры профилей, которые при расчете жесткости берутся в третьей степени, выделены утолщенными стрелками. С помощью данной таблицы конструктор может непосредственно оценить влияние того или иного параметра на жесткость профиля:

- Длина профиля ( $L$ ),
- Толщина стенки ( $s$ ),
- Размер сечения ( $a$ ),
- Модуль Юнга ( $E$ ) и модуль сдвига ( $G$ ).

При расчете на изгибную жесткость длина и размер сечения берутся в третьей степени, а толщина стенки и модуль Юнга – в первой. Соответственно, для повышения жесткости длина профиля должна быть наименьшей, а размеры сечения - наибольшими. В данном случае, эти параметры оказывают большее воздействие на жесткость, чем все остальные. Подобный расчет проводится для других видов нагружения, представленных в таблице на Рис. 3-12.

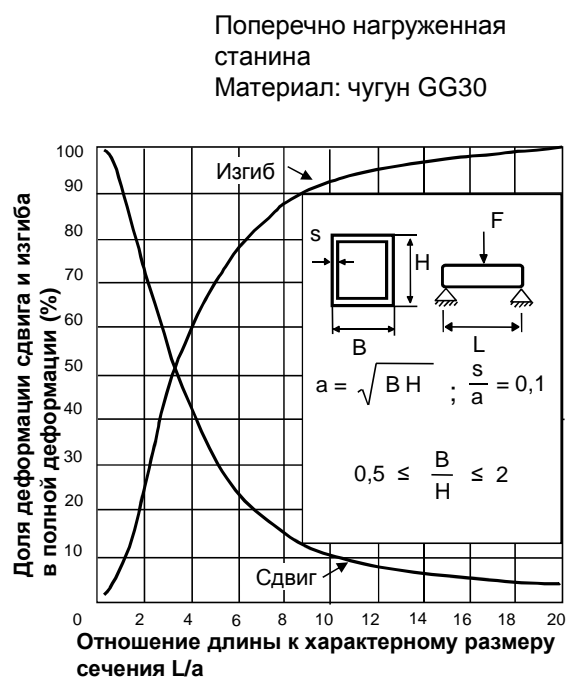
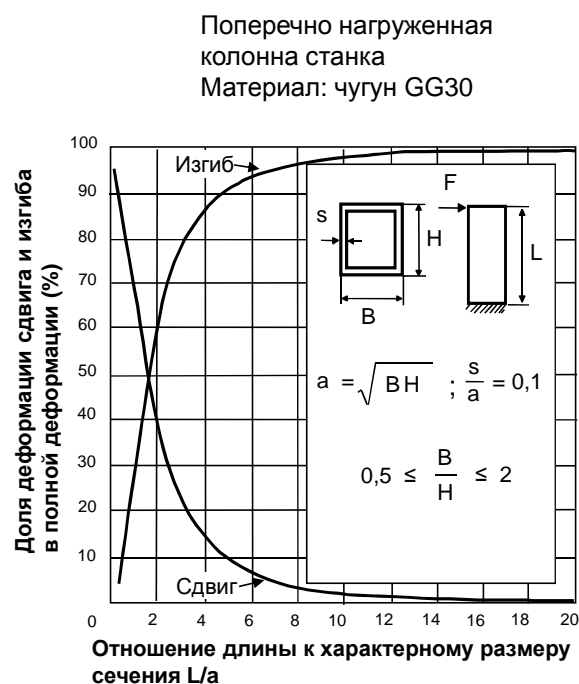


Рис. 3-13: Определение доли перемещения сдвига и изгиба в полной деформации поперечно нагруженных деталей

При расчете жесткости сдвига все параметры сечения учитываются в формуле линейно и, соответственно, при изменении, одинаково влияют на величину жесткости. Доля деформации сдвига и изгиба в суммарной деформации может быть определена с помощью графика, показанного на Рис. 3-13, в зависимости от соотношения длины профиля к размеру сечения.

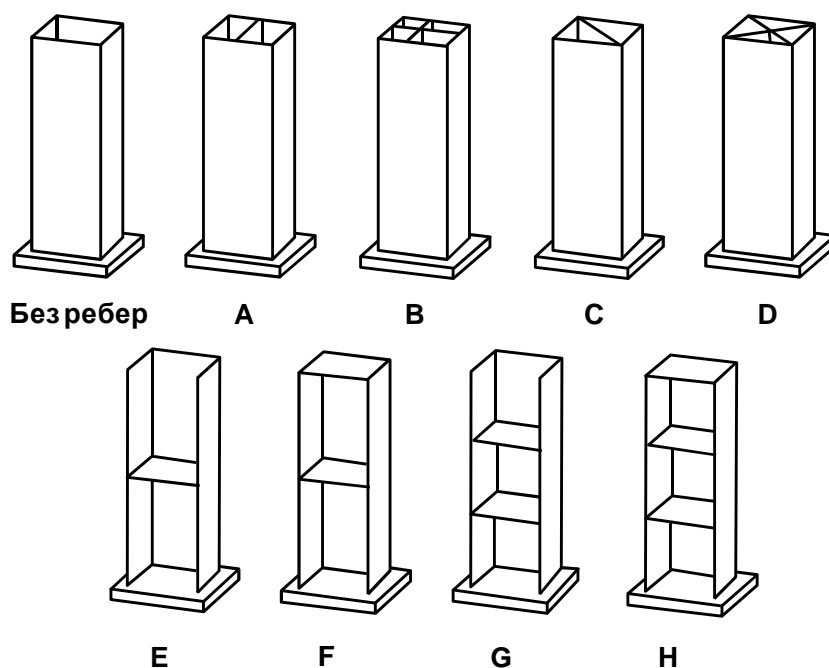


Рис. 3-14: Расположение ребер жесткости в колоннах станков

Жесткость изгиба и крутильная могут быть повышены применением ребер жесткости. Распространенные виды оребрения показаны на Рис. 3-14. Конструктивные варианты с



продольными ребрами показаны на эскизах А-Д, варианты с поперечными ребрами – на эскизах Е – Н.

Вид	Отн. жесткость на изгиб			Отн. жестк. на кручение			Относительный объем			Размеры			
	$\frac{F/2}{F/2} \rightarrow \square$ 50 % 100			$\frac{F}{F} \rightarrow X_1 \quad K = \frac{F}{X_1}$ 50 % 100			100 % 150			$L=455 \text{ мм}$ $b=154 \text{ мм}$ $h=154 \text{ мм}$ $s=4 \text{ мм}$			
			100			100			100	<div></div> <div></div>			
			100			9,4			93				
			120			101			122				
			111			12,1			115				
			120			101			145				
			112			18,2			138				
			118			116			132				
			118			104			125				
			142			119			163				
			142			117			157				
			100			104			107				
			100			109			115				
<div><div>■ Без верхней замыкающей пластины</div><div>■ С верхней замыкающей пластиной</div></div>													

Рис. 3-15: Жесткость на кручение и изгиб с различными вариантами установки ребер жесткости

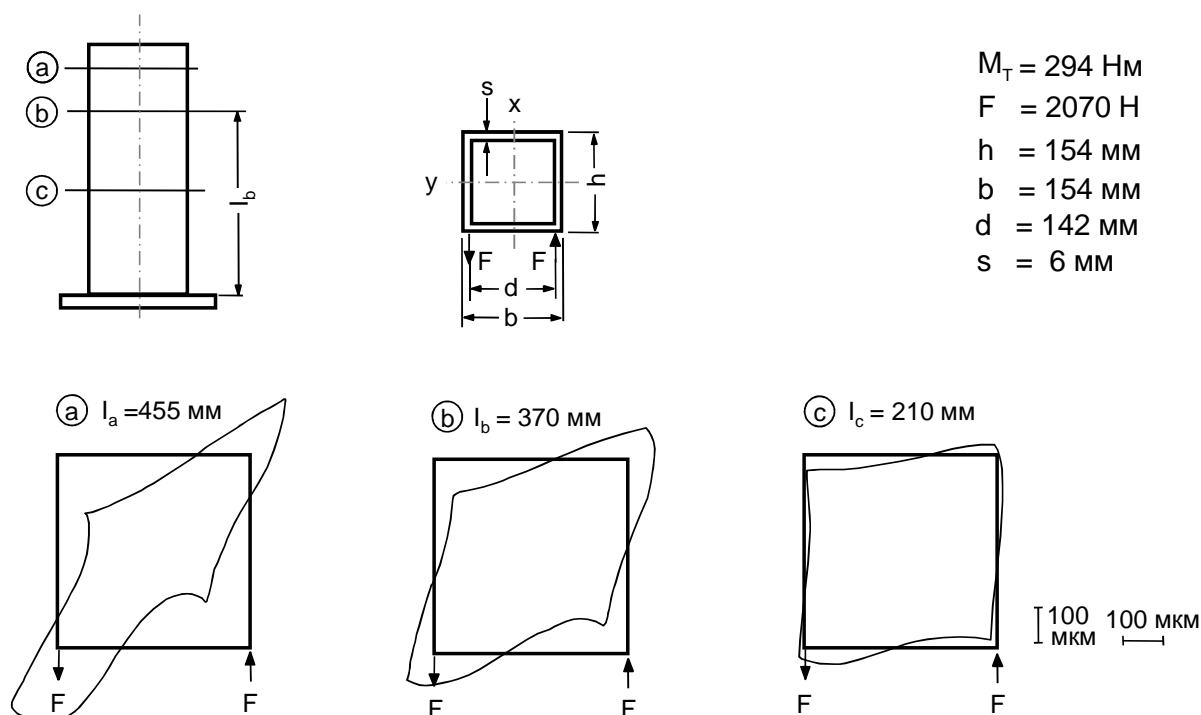
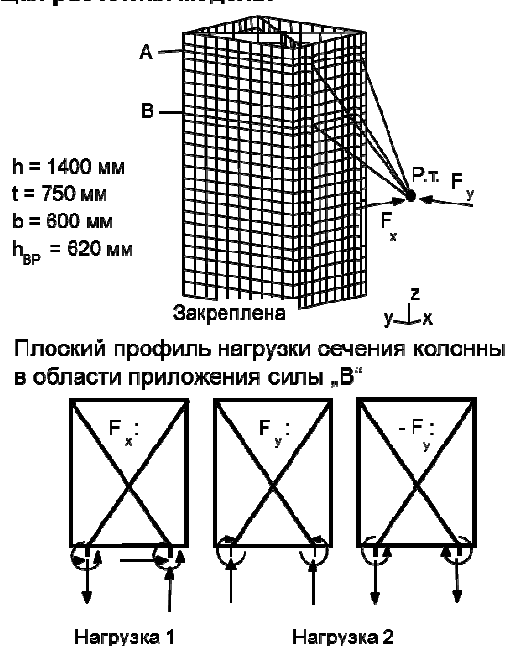


Рис. 3-16: Деформация открытой колонны без ребер жесткости при крутильной нагрузке

Для колонн с различным расположением ребер были рассчитаны методом конечных элементов значения жесткости и виды крутильных деформаций (Рис. 3-15, Рис. 3-16). При нагружении на изгиб установка продольных ребер позволяет значительно повысить жесткость конструкции. Напротив, установка поперечных ребер, а также верхних и нижних замыкающих пластин, практически не оказывает воздействия на величину жесткости. Нагрузка на кручение возникает при действии на деталь пары сил. Такой вид нагрузки вызывает деформацию сечения профиля. Ребра жесткости, препятствующие изменению формы сечения, повышают жесткость профиля на

кручение. К таким вариантам установки относятся верхние замыкающие пластины, поперечные перемычки и диагональные ребра. Деформация колонны станка без ребер жесткости под действием трех пар сил в трех плоскостях представлена на Рис. 3-16. На рисунке видно, что с удалением от плоскости закрепления колонны величина деформации возрастает. При систематическом анализе различных вариантов установки ребер жесткости следует учитывать не только реализуемую жесткость конструкции, но и необходимый объем конструкционного материала, а также длину сварных швов.

#### Общая расчетная модель:



#### Пример:

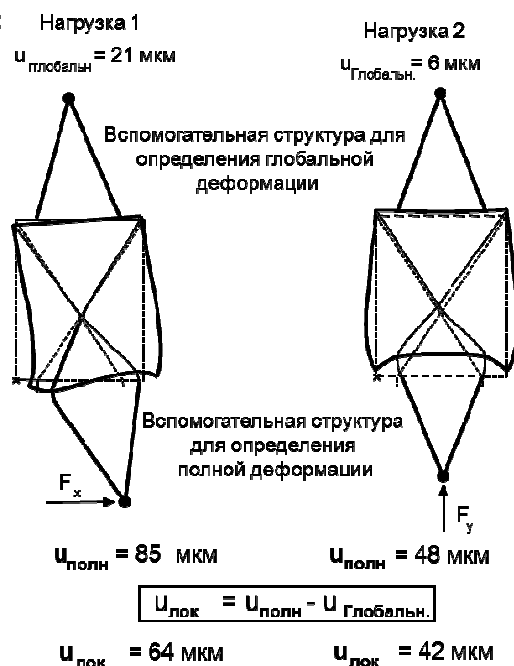
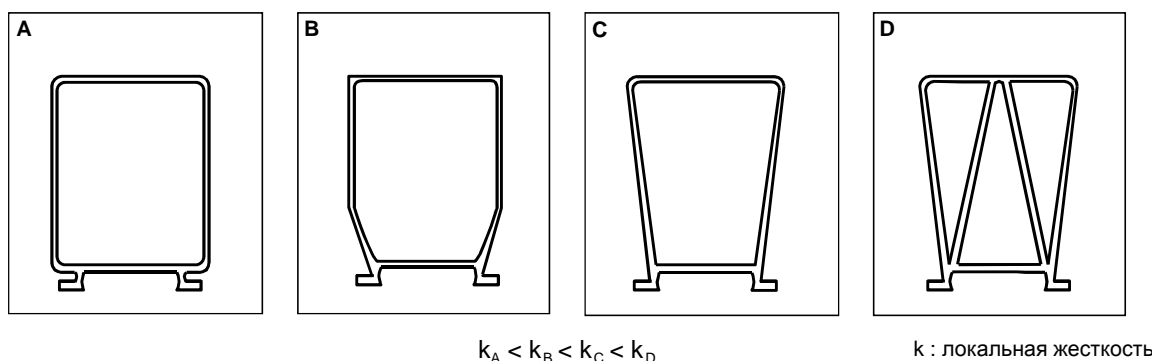


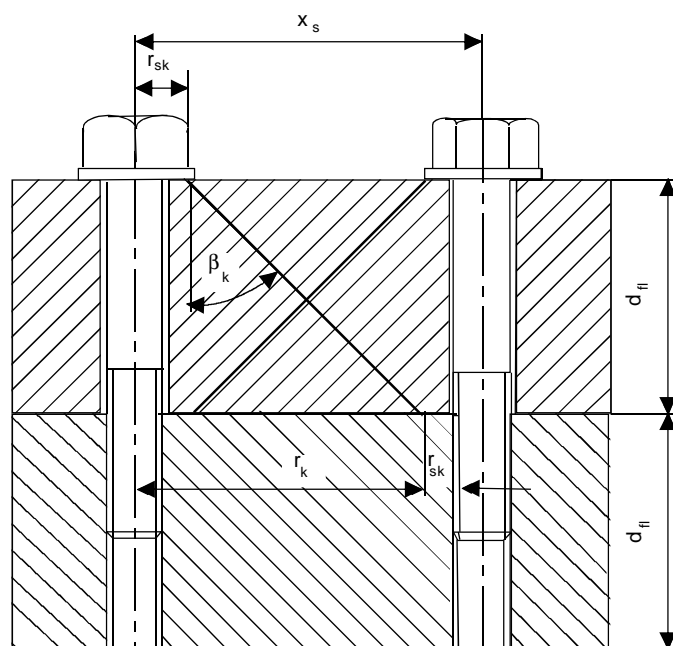
Рис. 3-17: Локальная и глобальная деформация колонны станка

Размеры сечения конструктивного элемента определяются расположением внешних стенок. Например, если необходимо спроектировать колонну станка с фиксированным расстоянием между направляющими 400 мм, различают два варианта конструктивного исполнения. В первом варианте ширина колонны превышает расстояние между направляющими, что позволяет реализовать максимальный осевой момент инерции. В зонах приложения сил толщина стенки должна быть увеличена, поскольку проходящий поток сил от направляющих через переднюю стенку колонны к задней стенке несколько раз изменяет свое направление, что ведет к значительным локальным деформациям. Во втором варианте конструктивного исполнения боковые стенки располагаются непосредственно в зоне действия сил, благодаря чему повышается локальная жесткость колонны. Однако глобальная жесткость будет относительно низкой, так как торсионный момент инерции относительно мал. На Рис. 3-17 представлены результаты расчета деформации для различных размеров сечения В и толщины стенки D закрытой колонны. Локальные деформации, в зависимости от вида нагрузки и конструктивного исполнения, значительно превышают глобальные деформации и, следовательно, определяют поведение детали под действием нагрузок. При нагрузке поперечной силой и моментом сил (схема нагрузки №1) конструктивные изменения оказывают различное воздействие на жесткость колонны. При нагрузке на растяжение - сжатие (схема №2) увеличение толщины стенки положительно влияет на величину локальной жесткости в точке резания. Помимо выбора оптимальных размеров сечения и формы сечения профиля, дальнейшее повышение жесткости возможно путем установки ребер жесткости.



**Рис. 3-18: Виды конструкций для распределения потока сил**

Для повышения локальной жесткости конструктивного элемента целесообразным является применение формы сечения, которая позволяет реализовать оптимальную форму потока сил. При выборе конструктивного решения необходимо определить оптимальную комбинацию максимального размера сечения для повышения глобальной жесткости и расположения опор направляющих. Некоторые конструктивные варианты представлены на Рис. 3-18. Форма сечения А является неоптимальной, так как податливость стенок в зоне крепления направляющих негативно влияет на общий уровень жесткости. Формы В и С позволяют достичь значительного повышения локальной жесткости, так как направляющие опираются на боковые стенки. В сравнении с формой А, различия в форме незначительны, благодаря чему на функциональность компонента не оказывается негативного влияния. Применение внутренних ребер жесткости в модели D позволяет достичь значительно лучшей поддержки направляющих, а также повысить жесткость колонны на изгиб и кручение.



$x_s$  : Расстояние между болтами

$d_{fl}$  : Толщина фланцев

$r_{sk}$  : Радиус головки болта

$r_k$  : Радиус контактной поверхности

$\beta_k$  : Угол наклона границы эпюры давления

$$x_s = d_{fl} \tan \beta_k + 2 r_{sk}$$

Рис. 3-19: Расчет фланцевых соединений

При соединении фланцев с помощью болтов необходимо добиться равномерного распределения давления по всей поверхности соединения. Для этого требуется рассчитать оптимальное расстояние между болтами при заданной толщине фланцев. Исследования показали, что только часть фланца, непосредственно прилегающая к болту, участвует в передаче усилий (Рис. 3-19). Эта площадь контакта вокруг болта увеличивается с повышением толщины фланца из-за градиента давления. Для максимальной жесткости соединения зоны нагружения вокруг отдельных болтов должны пересекаться.

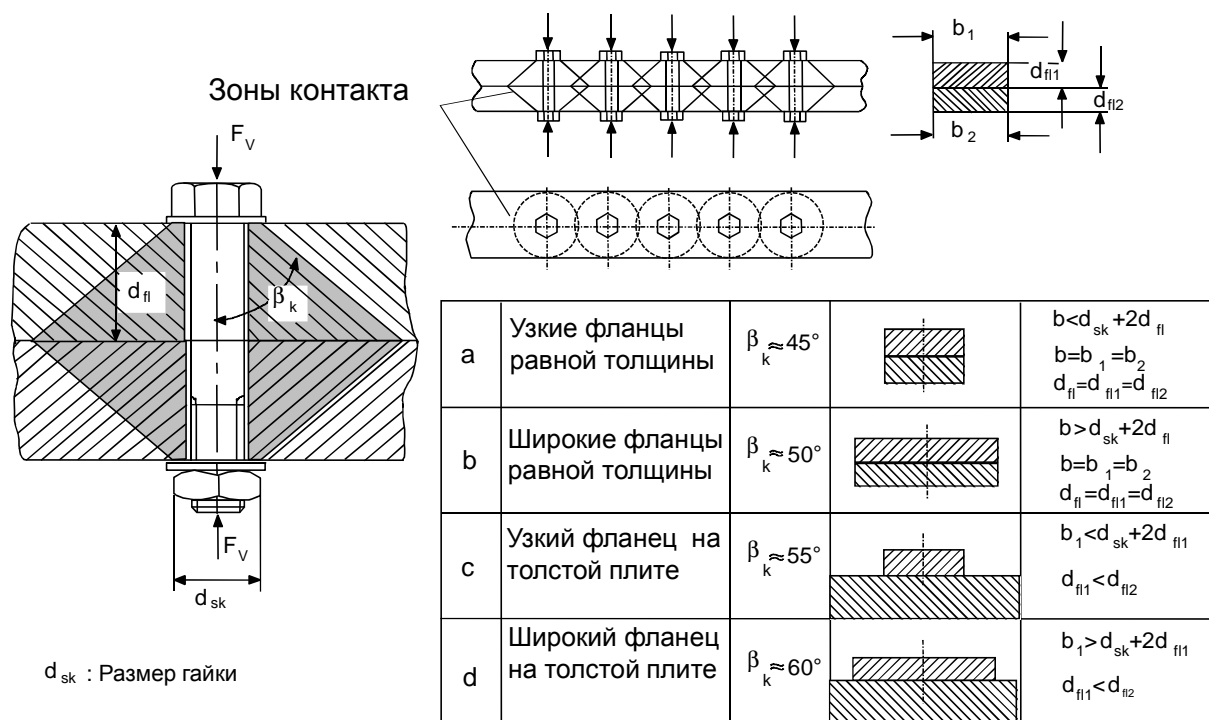
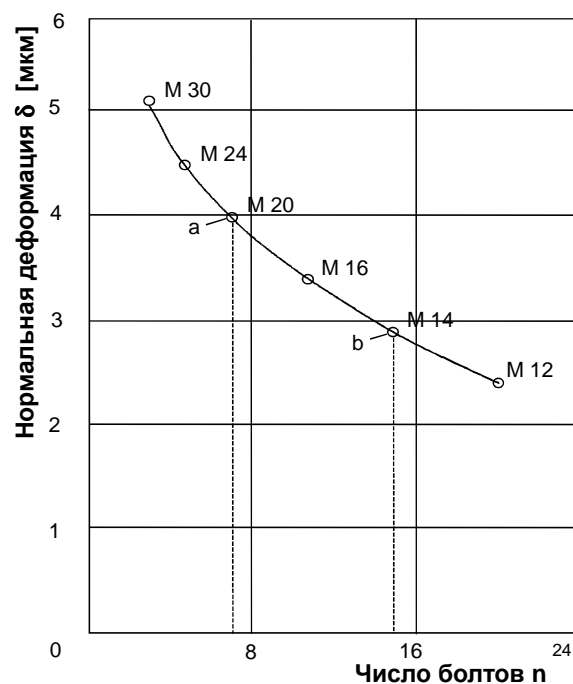
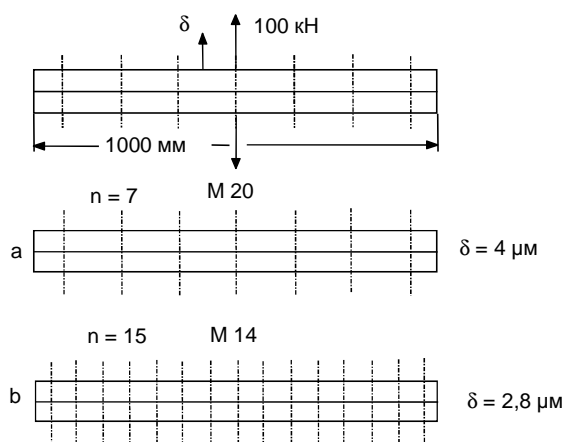


Рис. 3-20: Взаимосвязь между геометрией фланцев и расположением контактных зон



Толщина фланца  $d_{FL} = 60$  мм  
 Площадь сечения болта  $n A_s = 1575$  мм<sup>2</sup>



Большее число мелких винтов  
 предпочтительнее  
 меньшего числа крупных

Рис. 3-21: Раскрытие резьбового стыка

На Рис. 3-20 и Рис. 3-21 представлены приблизительные значения угла градиента давления  $\beta_k$  для соединения фланцев различных размеров. Из рисунков видно, что площадь зоны нагружения увеличивается с повышением жесткости соединения. На Рис. 3-21 показано изменение величины деформации фланца при применении различных резьбовых соединений. Толщина фланцев и нагрузка в данном случае постоянны.

## Резьбовое соединение



Рис. 3-22: Описание резьбового соединения через характеристики упругих демпфирующих элементов

Жесткость резьбового соединения определяется жесткостью болта, фланца и жесткостью их контакта. На Рис. 3-22, слева, показана модель резьбового соединения с применением пружинно-демпферных элементов. С правой стороны схематично показана зона контакта двух фрезерованных поверхностей в свободном состоянии. На рисунке видно, что площадь контакта относительно мала. Даже при наложении силы и пластическом деформировании микронеровностей соединяемых деталей невозможно добиться их полного прилегания.

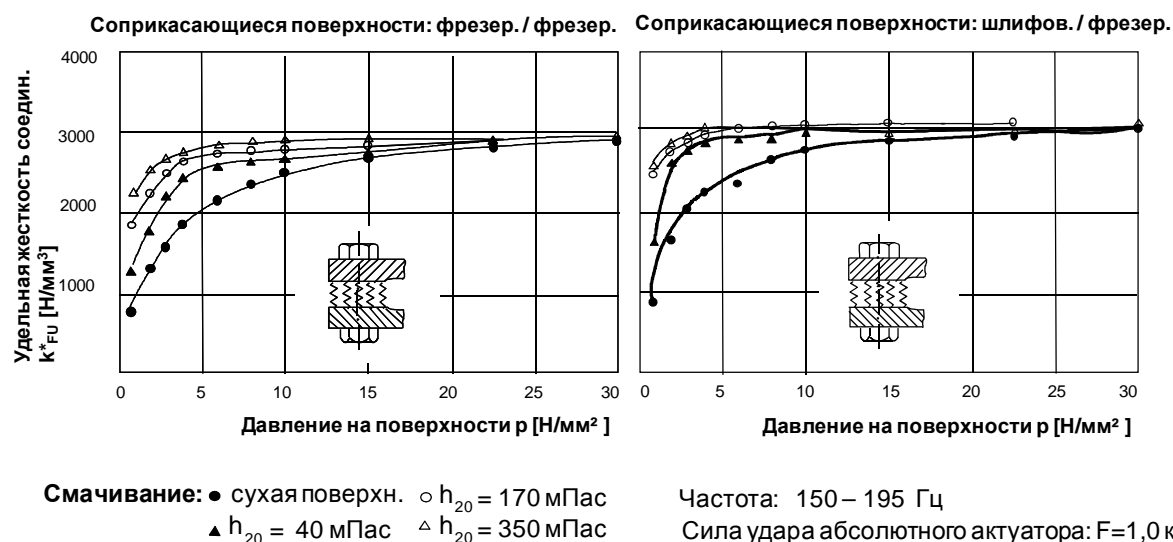


Рис. 3-23: Воздействие смачивания на удельную жесткость соединения

Важной характеристикой резьбовых соединений, равно как и соединений другого типа, например, посадки с натягом, прессового соединения вал-ступица, является жесткость зоны контакта соприкасающихся деталей. Контактная жесткость зависит от качества поверхности деталей. Шероховатость поверхности в зоне контакта оказывает непосредственное воздействие на жесткость соединения. При увеличении прижимной силы жесткость соединения увеличивается, так как повышается площадь контакта на уровне микронеровностей, которые участвуют в передаче потока сил. Отношение прижимной силы и величины деформации было эмпирически описано с помощью следующего уравнения:

$$\delta = \alpha \cdot p^m$$

Деформация  $\delta$  определяется как функция среднего значения контактного напряжения  $p$ . Здесь  $\alpha$  – угол опрокидывания в мкм/м,  $\delta$  имеет размерность мкм,  $p$  – Н/см². Причем  $\alpha$  и  $m$  зависят от шероховатости поверхности. Для пары шлифованных деталей, например,  $\alpha = 0,6$  и  $m = 0,4$ . В общем случае, высокое качество поверхности позволяет достичь высокой контактной жесткости.

Проведенные исследования поведения соединений позволили установить изменение их характерных параметров в зависимости от удельного давления, наличия смачивания, динамической нагрузки соединения и качества поверхности пары соединяемых деталей. Для определения универсально применимой величины жесткости были проведены исследования динамического состояния, приведенного к площади соединения. Результаты показаны на Рис. 3-23.

Было установлено, что удельная жесткость соединений экспоненциально растет с увеличением контактного напряжения. Значительные изменения жесткости наблюдаются при низких значениях контактного напряжения  $p < 10$  Н/мм². Причиной является резкое увеличение площади контактной поверхности при наложении внешней силы. Применение смачивающей среды также позволяет повысить площадь контакта и увеличить жесткость соединения в области контактных напряжений до  $p = 15$  Н/мм².

**Модель:**

Толщина основания: 30 мм

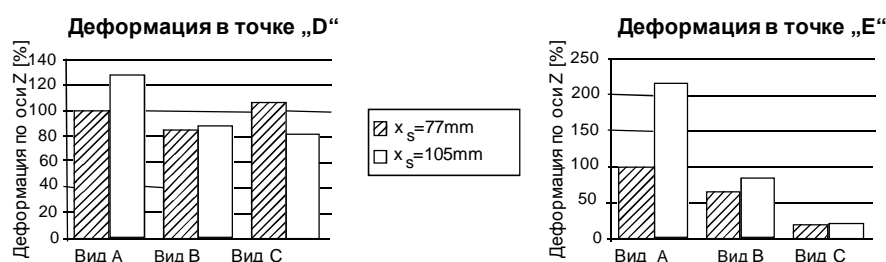
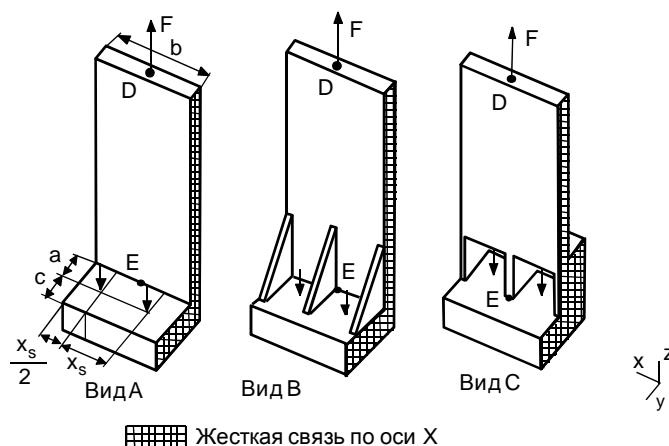
Толщина стенки: 20 мм

 $a = 30$  мм,  $c = 40$  мм $x_s^* = 77$  мм макс. Толщина ребра: 20 мм $x_s^* = 105$  мм макс. Толщина ребра: 60 мм

Усилие сжатия: 58 кН (M12)

 $F/b = 76$  Н/мм

\*оптим. расст. между болтами: 60 мм

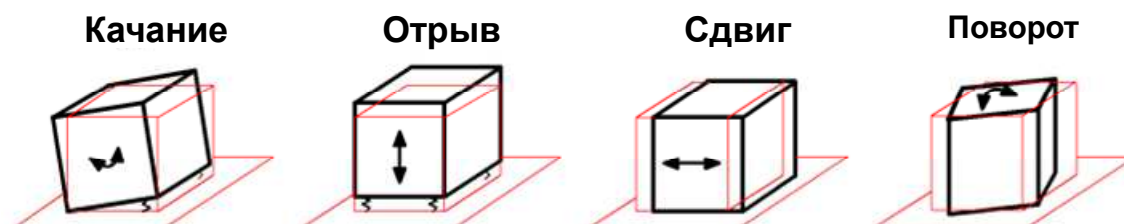
 $(x_s = d_{FL} \tan \beta + 2r_{СК}, \beta = 50^\circ - 60^\circ)$ **Рис. 3-24: Сравнение деформации фланцев различной конструкции**

В пределах фланца поток сил концентрируется в зонах соединения с прилегающим элементом. Изменение направления потока сил и его концентрация в контактных зонах резьбовых соединений вызывает напряжение изгиба фланца и значительные местные деформации. На Рис. 3-24 показан механизм возникновения нагрузки на изгиб. При расположении болтов непосредственно у вертикальной стенки колонны напряжение на изгиб снижается. Применение ребер, поддерживающих вертикальную стенку и фланец в зоне расположения болтов, позволяет повысить жесткость. Такой же эффект дает увеличение толщины фланца. Расположение болтов в плоскости вертикальной стенки позволяет избежать нагрузки на изгиб подошвы фланца. Необходимые для этого пазы оказывают ослабляющее действие на сечение стенки колонны в зоне соединения. Таким образом, при малом расстоянии между болтами равномерное нагружение соединения и жесткость соединения могут потерять свою добротность из-за большой податливости вертикальной стенки. Поскольку жесткость конструкции в точке D определяет суммарную жесткость детали, предпочтительным является вариант В - более простой в изготовлении и с оптимизированным расположением болтов.



- 1 Введение
- 2 Влияние статических нагрузок
- 3 Влияние динамических нагрузок
- 4 Влияние температур
- 5 Заключение

**Колебания твердых тел**  
Относительные перемещения в направляющих и соединениях



**Изгибные и крутильные колебания**  
Формы собственных колебаний корпусных деталей

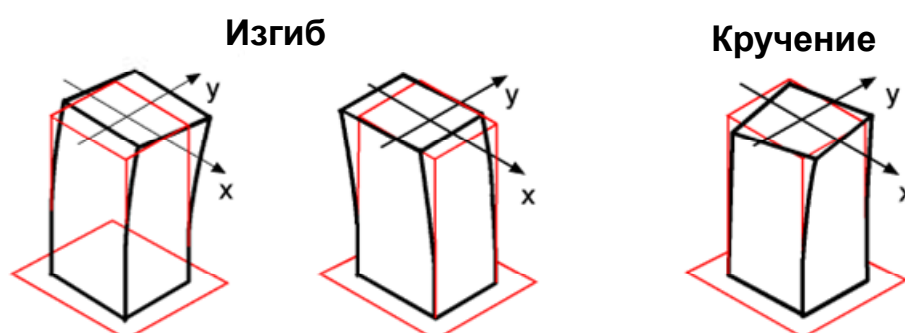


Рис. 3-25: Типичные формы собственных колебаний корпусных деталей станков

На Рис. 3-25 представлены виды колебательных форм корпусных деталей станков при динамических нагрузках. Различают колебательные формы твердого тела (без упругой деформации компонента), а также крутильные и изгибные колебательные формы. Применительно к структурным компонентам станков, такие колебательные формы характерны для колонн, ползунов и корпусов шпинделей. Изгибные и крутильные колебания характерны для колонн и станин. Столы заготовок, как правило, подвержены твердотельным колебаниям параллельно или перпендикулярно к направляющим. Собственные частоты колебаний в большой степени зависят от размеров станка. Приблизительный диапазон частот колебаний компонентов станка лежит между 20 Гц и 200 Гц. Собственные частоты шпинделя могут иметь гораздо более высокие значения (до 1200 Гц).

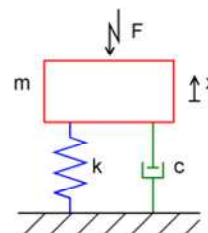
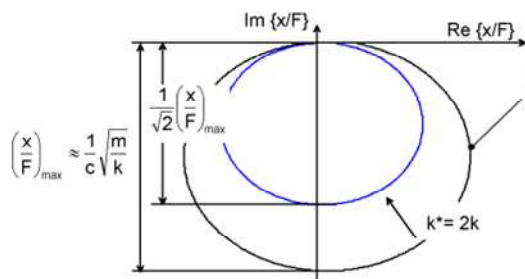
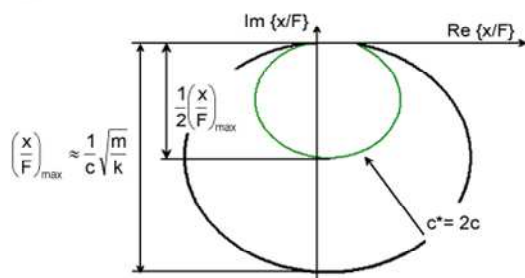
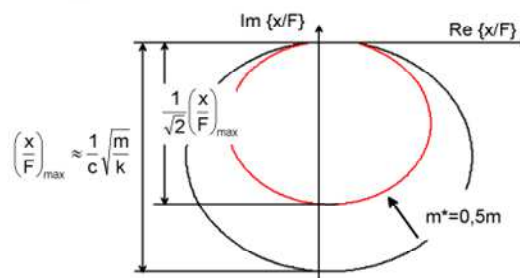
1. Повышение жесткости  $k$ Схема одномассовой колебательной системы  $m^*$ 2. Повышение коэффициента демпфирования  $c^*$ 3. Снижение колеблющейся массы  $m^*$ 

Рис. 3-26: Влияние различных параметров на амплитудно-фазовую характеристику податливости одномассовой колебательной системы ОК

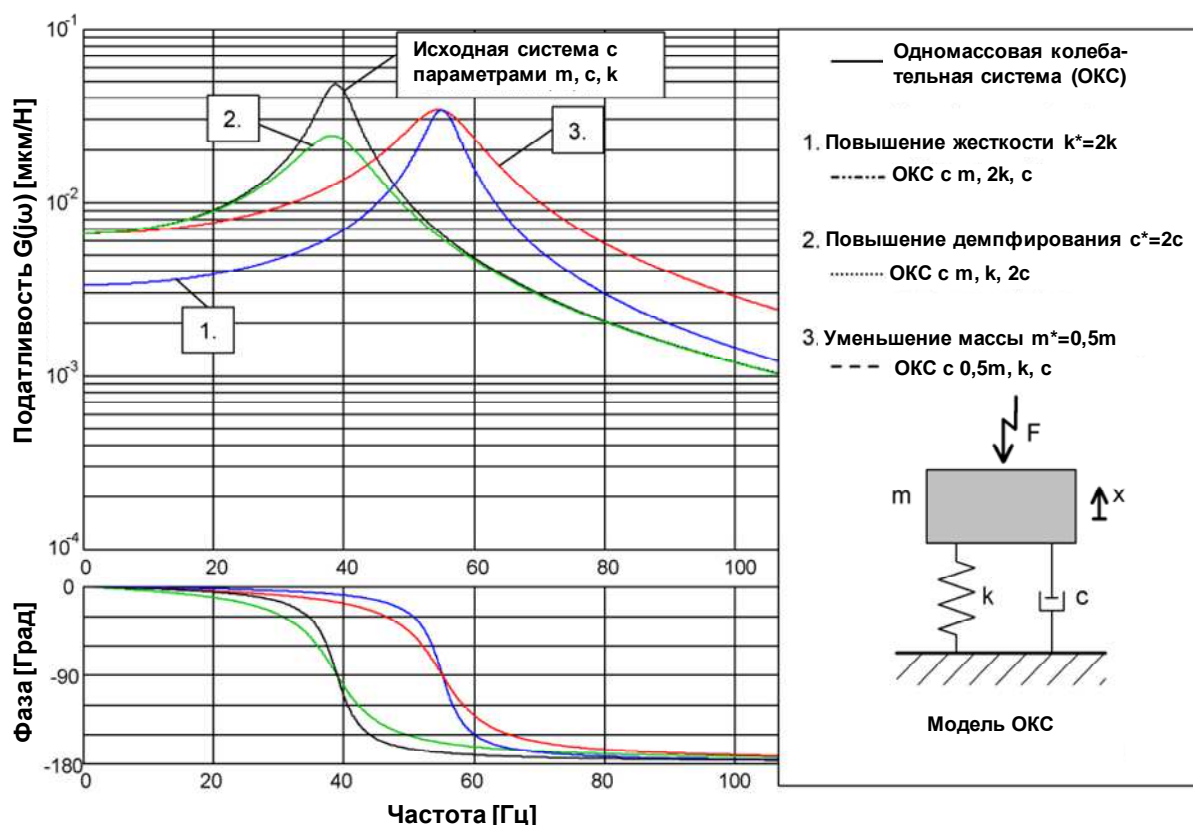


Рис. 3-27: Влияние различных параметров на амплитудно-фазово-частотную характеристику податливости ОК Системы

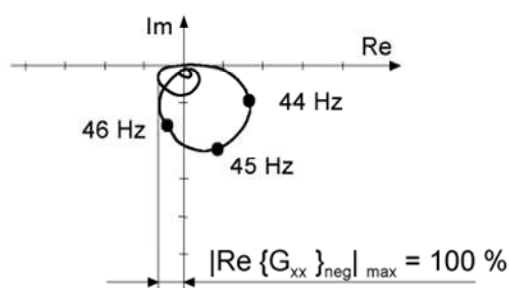
На Рис. 3-26 и Рис. 3-27 показаны амплитудно-фазовые и амплитудно-фазово-частотные характеристики одномассовой колебательной системы для различных значений жесткости, коэффициента демпфирования и массы. Путем уменьшения максимального значения отрицательной действительной части динамической

податливости станка с помощью конструктивных решений возможно добиться улучшения стабильности обработки резанием.

**Стандартная легкая  
фрезерная головка**



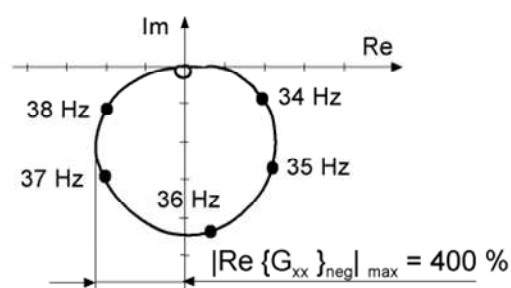
$m_1=100\%$



**Тяжелая 5-координатная  
фрезерная головка**



$m_1=300\%$



**Рис. 3-28: Влияние массы фрезерной головки портального фрезерного станка на динамическую податливость станка и стабильность обработки**

На практике повышение жесткости и снижение массы компонентов станков возможно в конструктивно определенных пределах. На Рис. 3-28 показан пример негативного воздействия неоптимального распределения массы на динамическое состояние портального фрезерного станка. Станок с установленной стандартной фрезерной головкой имеет ярко выраженную точку резонанса при частоте 45 Гц. Колебательная форма на данной частоте включает изгибную деформацию вертикального ползуна и деформацию направляющих поперечного ползуна. С правой стороны рисунка представлена амплитудно-фазовая характеристика станка с установленной пятикоординатной фрезерной головкой, которая значительно тяжелее стандартной. Изменения в амплитудно-фазовой диаграмме показывают влияние дополнительной массы на динамическое состояние станка. Собственная частота уменьшилась до 36 Гц. Максимальная негативная действительная часть, характеризующая склонность структуры к возникновению неустойчивого состояния в процессе обработки, увеличилась в 4 раза.

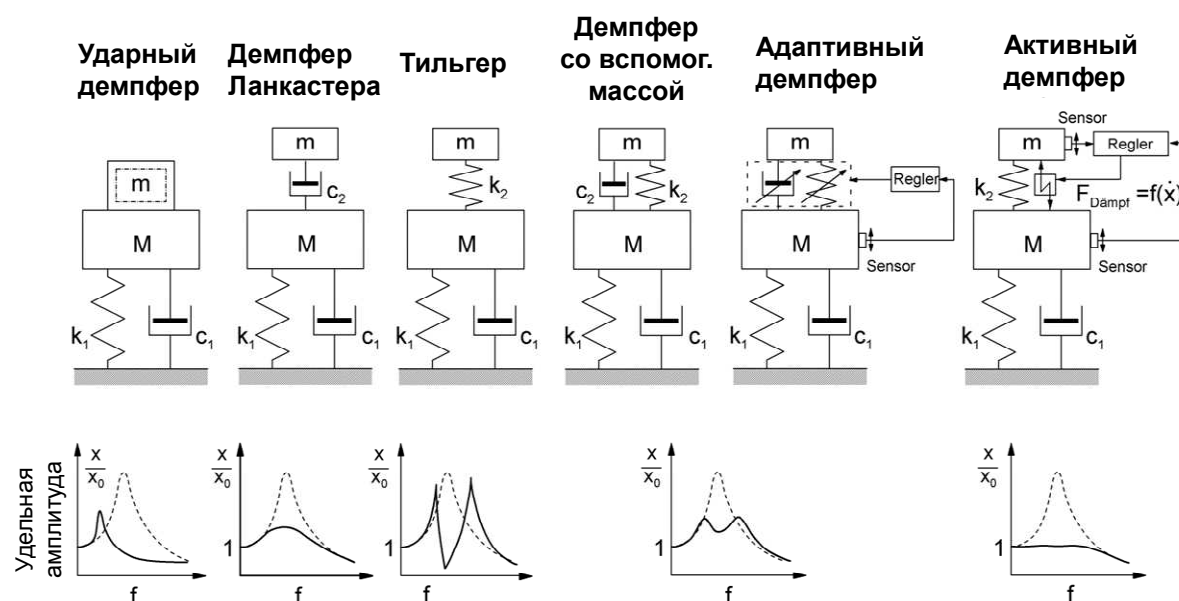
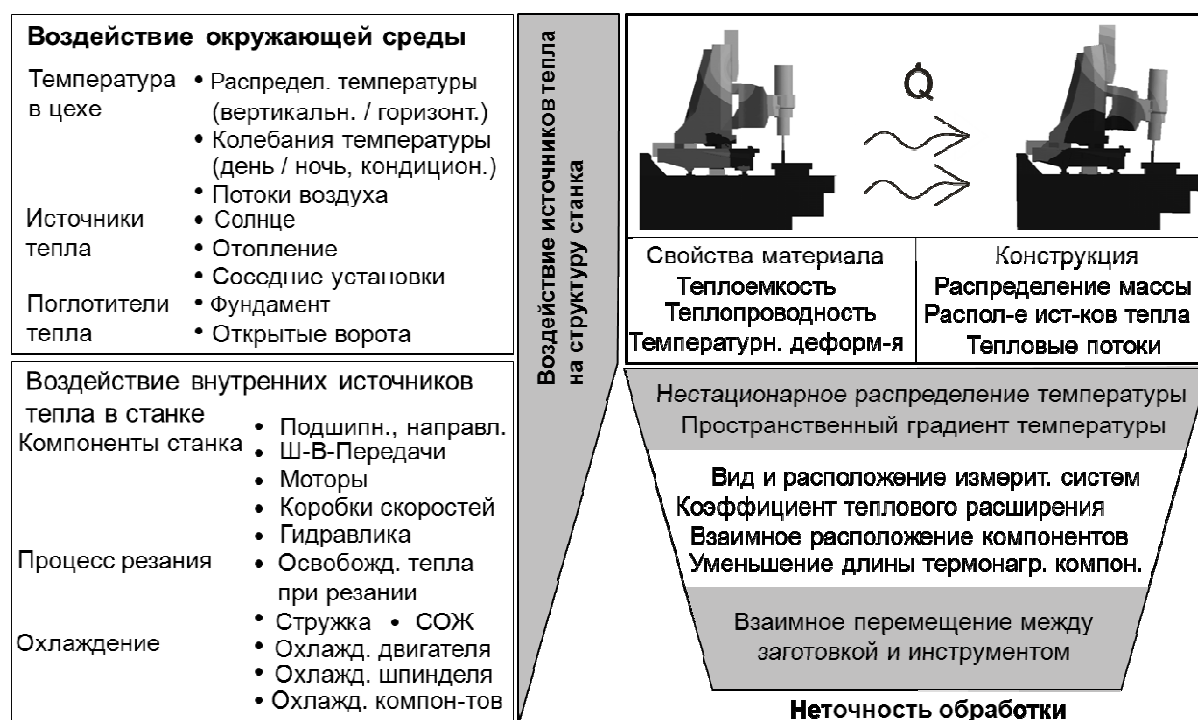


Рис. 3-29: Активные и пассивные вспомогательные демпфирующие системы

Задача вспомогательных демпфирующих систем заключается в повышении общего уровня демпфирования станка. Различают активные и пассивные демпфирующие системы (Рис. 3-29). Пассивные системы, как правило, состоят из дополнительной массы и эластичных промежуточных компонентов. Данные системы устанавливаются на деталь, в наибольшей степени подверженную воздействию вибраций, по возможности в зону максимальной амплитуды колебаний. Демпфирующий эффект достигается путем диссипации энергии колебаний основной системы за счет колебаний вспомогательной массы. К пассивным системам относятся вспомогательные демпферы, демпферы трения, а также демпфирующие втулки с масляной пленкой (squeeze film). Демпферы со вспомогательной массой разделяются по виду установки вспомогательной массы на ударные, демпферы Ланкастера и демпферы с жестким закреплением дополнительной масса – т.н. «тильгеры». Пассивные системы эффективны в фиксированном узком диапазоне частот. Собственные частоты узлов станка в зависимости от расположения последних в рабочей зоне, а также в зависимости от параметров заготовки и инструмента, могут меняться в достаточно широких пределах, что зачастую ведет к частичной или полной потере эффективности пассивных вспомогательных систем. Для решения этой технической проблемы были разработаны пассивные адаптивные системы, автоматически изменяющие свойства вспомогательной системы и поддерживающие ее работоспособность в более широком диапазоне частот. Для реализации подобных систем, как правило, применяются соединительные элементы, жесткость и/или демпфирование которых может изменяться в заданном диапазоне. Наиболее часто находят применение пассивные демпферы со вспомогательной массой и эластичными проставками. Демпферы Ланкастера и тильгеры в станкостроении применяются сравнительно редко.

- 1 Введение**
- 2 Влияние статических нагрузок**
- 3 Влияние динамических нагрузок**
- 4 Влияние температур**
- 5 Заключение**



**Рис. 3-30: Причины термоэластичной деформации станков**

Деформации станков вызываются не только статическими и динамическими нагрузками, но и температурными воздействиями. Точность обработки в большой мере определяется устойчивостью станков к изменениям температур. На Рис. 3-30 представлены виды источников тепла, воздействующие на станок при обработке, и их влияние на точность обработки. Различают внешние (воздействие окружающей среды) и внутренние (входящие в структуру станка) источники тепла. Внутренние источники непосредственно определяют распределение температуры в структуре станка. В зависимости от величины потери мощности в подшипниках, моторах, коробках скоростей и т.п. создаются локальные температурные поля, воздействующие на общее распределение температуры.

При обработке в дополнение к названным источникам тепла необходимо прибавить выделяющееся при резании тепло. К воздействиям окружающей среды относятся: вертикальные и горизонтальные градиенты температуры в цехе, дневное изменение температуры, тепло, вырабатываемое прочими станками и установками в непосредственной близости.

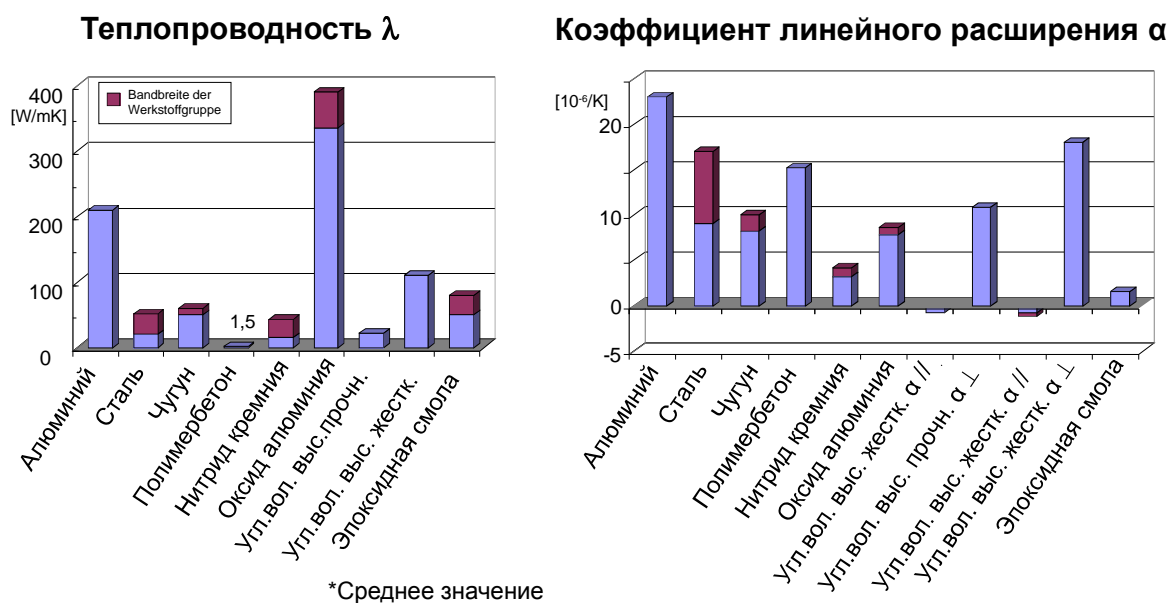


Рис. 3-31: Термозластичные свойства материалов

На Рис. 3-31 представлены термозластичные свойства некоторых конструкционных материалов. Например, полимербетон отличается низкой теплопроводностью и высокой приведенной теплоемкостью, что обуславливает его термодинамическую инертность. Это означает, что температурные колебания вблизи станка ведут к незначительным изменениям температуры деталей из полимербетона и, следовательно, к незначительным деформациям. Из данного материала часто изготавливаются станины и другие структурные компоненты станков. Композиционные материалы на основе углеродных волокон также имеют низкий коэффициент линейного расширения, особенно в направлении залегания волокон. Данное свойство используется при расчете и конструировании шпинделей. Данный материал также применяется для снижения веса компонентов высокоскоростных станков, например ползунов, а также манипуляторов роботов.

В дополнение к названным материалам, для производства шпинделей также находит применение техническая керамика. Она отличается низкой теплопроводностью и, в отличие от стали, низким коэффициентом линейного расширения.



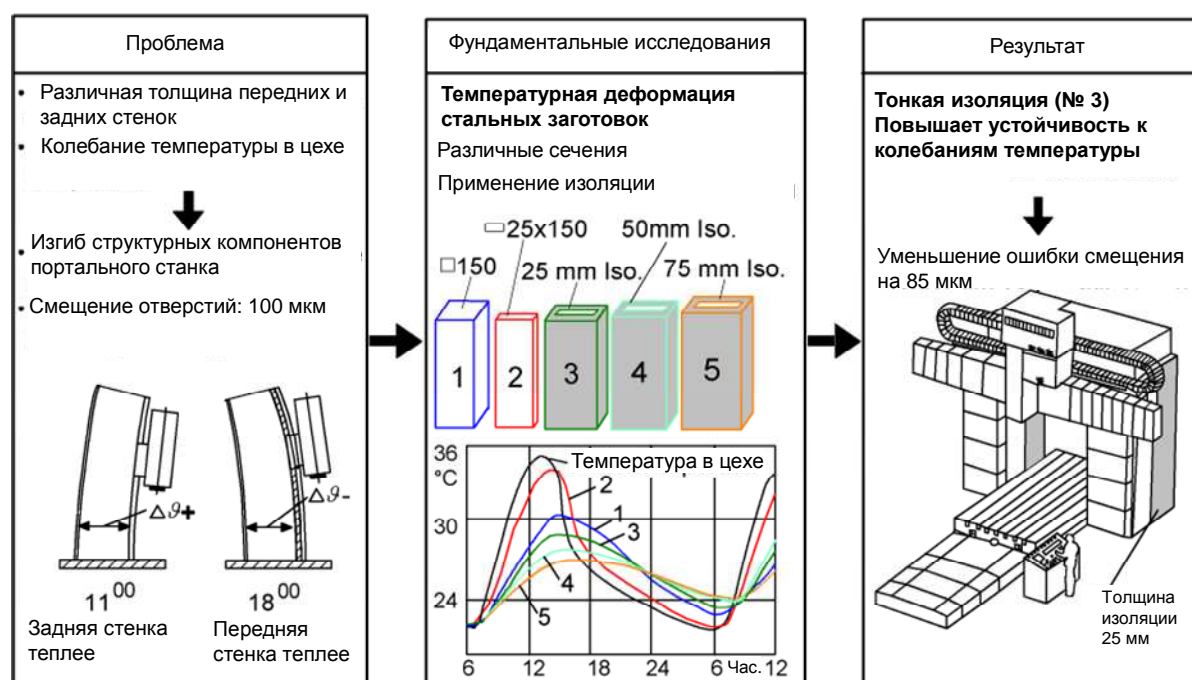


Рис. 3-32: Термоизоляция структурных компонентов

Целенаправленная изоляция структурных компонентов станков от воздействий внешней среды позволяет уменьшить термоэластичные деформации. Показанная на Рис. 3-32 колонна портального фрезерного станка выполнена с различной толщиной передней и задней стенок. В первой половине дня поднимающаяся температура в цехе нагревает более тонкую заднюю стенку станка быстрее, чем переднюю. Вследствие этого колонна наклоняется вперед, как биметаллическая пружина. Во второй половине дня задняя стенка охлаждается быстрее, что ведет к наклону колонны в обратном направлении. На практике это ведет к возникновению ошибки положения отверстий в 100 мкм/м при сверлильной обработке. Для компенсации неоднородного термоэластичного поведения стенок колонны были установлены изолирующие пенополистирольные пластины. Необходимая толщина изолирующих пластин была установлена экспериментально. На Рис. 3-32 показаны кривые температуры различных деталей при изменении температуры окружающей среды. Температура стального листа толщиной 25 мм (кривая 2) практически в точности повторяет кривую температуры в цехе. Лист толщиной 150 мм (кривая 1) вследствие большой температурной инертности следует кривой температуры в цехе со значительными временными задержками и гораздо меньшей амплитудой колебаний. Установка изолирующей пластины толщиной 25 мм на стальной лист толщиной 25 мм позволяет достичь уровня термодинамической инертности более толстого листа. На практике применение изоляционных пластин толщиной 25 мм позволило уменьшить погрешность положения отверстий со 100 мкм/м до 15 мкм/м.

Для уменьшения температурных деформаций кроме применения дополнительных изоляционных материалов при изготовлении структурных компонентов станка могут применяться современные материалы, имеющие хорошие термоэластичные свойства.

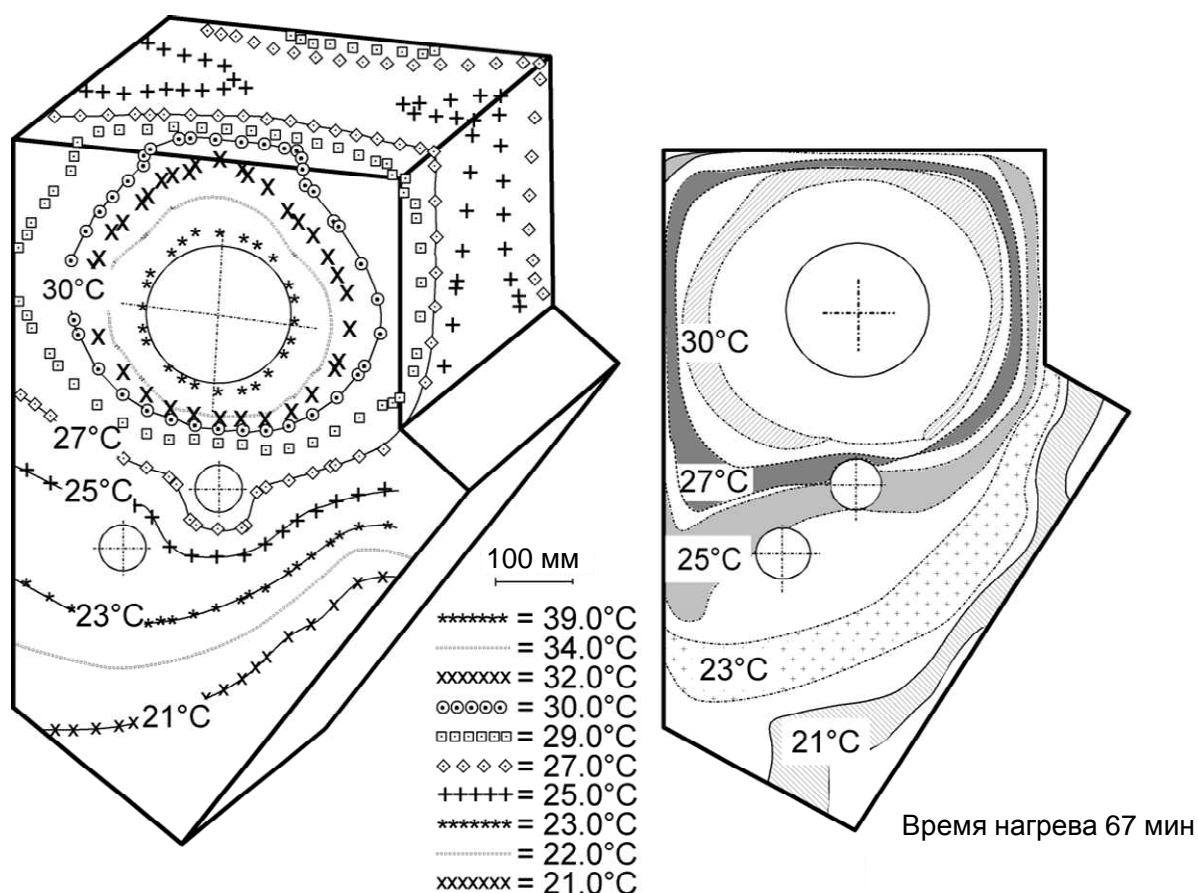


Рис. 3-33: Измеренные и рассчитанные изотермы на шпиндельной коробке

При установке станка в цехе следует выбирать зоны, наименее подверженные постоянному действию солнечного света и колебаниям температуры. Вследствие переменных температурных воздействий в станке, как правило, устанавливается нестационарное температурное распределение, приводящее станок в термически неустойчивое состояние. На Рис. 3-33 показан пример экспериментально определенного и рассчитанного методом конечных элементов температурного распределения в корпусе шпинделя. Время нагрева составило 67 минут. Температурное распределение зависит от интенсивности и пространственного расположения источников тепла, термодинамических свойств материала, конструкции станка и теплопроводности его элементов и соединений. Источники тепла подразделяются на активные и пассивные. Активные источники (например, подшипники) сами вырабатывают тепло за счет механических потерь. Пассивные элементы, напротив, подвергаются только нагреву извне. Суммарное воздействие этих источников на величину деформации и смещение положения инструмента относительно заготовки также определяется конструктивным исполнением и термоэластичными свойствами материалов. При этом особенное значение имеет вид соединения деталей и их относительное расположение.

- 1 Введение
- 2 Влияние статических нагрузок
- 3 Влияние динамических нагрузок
- 4 Влияние температур

## 5 Заключение

### Введение

- Типичные структурные компоненты и их функции
- Оценка конструкционных материалов с точки зрения статики, динамики и термодинамики
- Полимербетон: производство, наполнители и связующие вещества
- Вспомогательные средства конструктора для оценки параметров металлообрабатывающих станков

### Статика

- Определение жесткости
- Распределение сил в станке
- Расчет структурных компонентов на жесткость
- Конструирование фланцевых соединений
- Описание резьбовых соединений посредством упругих и демпфирующих элементов

### Динамика

- Типичные формы собственных колебаний структурных компонентов
- Факторы, воздействующие на динамическую податливость
- Дополнительные системы для улучшения динамической податливости

### Термодинамика

- Причины термоэластичных деформаций
- Термодинамические свойства различных конструкционных материалов
- Способы термоизоляции