

**Ключевые слова:**

станок, статическая, динамическая и тепловая жесткость, демпфирование, «умные» материалы и конструкции

О МАТЕРИАЛАХ В СТАНКОСТРОЕНИИ

Александр КУЗНЕЦОВ

Рассмотрены перспективы применения традиционных материалов, таких как сталь, чугун и сплавы при создании инновационных станков. Показаны возможности и преимущества использования современных материалов, обладающих особыми свойствами, таких как гранит, керамика, минеральное литье. Приведен обзор современных «умных» материалов – сплавов с эффектом памяти формы, пьезоэлектрических, керамических материалов и т.д.

Развитие научно-технического прогресса в области материального производства определяется и обуславливается применением научных и технических достижений, базирующихся на изучении физических процессов, явлений, систем и структур, способов, форм и видов их взаимодействий, приводящих к созданию новых технологических принципов, более эффективных технологий, машин, оборудования, а также совершенствованию и развитию существующих методов и способов производства изделий.

Совершенствование и создание новых предметов (деталей, устройств, механизмов и машин), вызываемое развитием нужд и потребностей общества, изменение и формирование новых функциональных и качественных свойств предметов, их характеристик и параметров обуславливают соответствующие требования к изменению, развитию и созданию новых процессов, технического и технологического оборудования, а также к развитию его (оборудования) технико-технологических и иных параметров

и характеристик, в частности производительности, точности и эффективности, которая определяется затратами ресурсов на их создание и эксплуатацию.

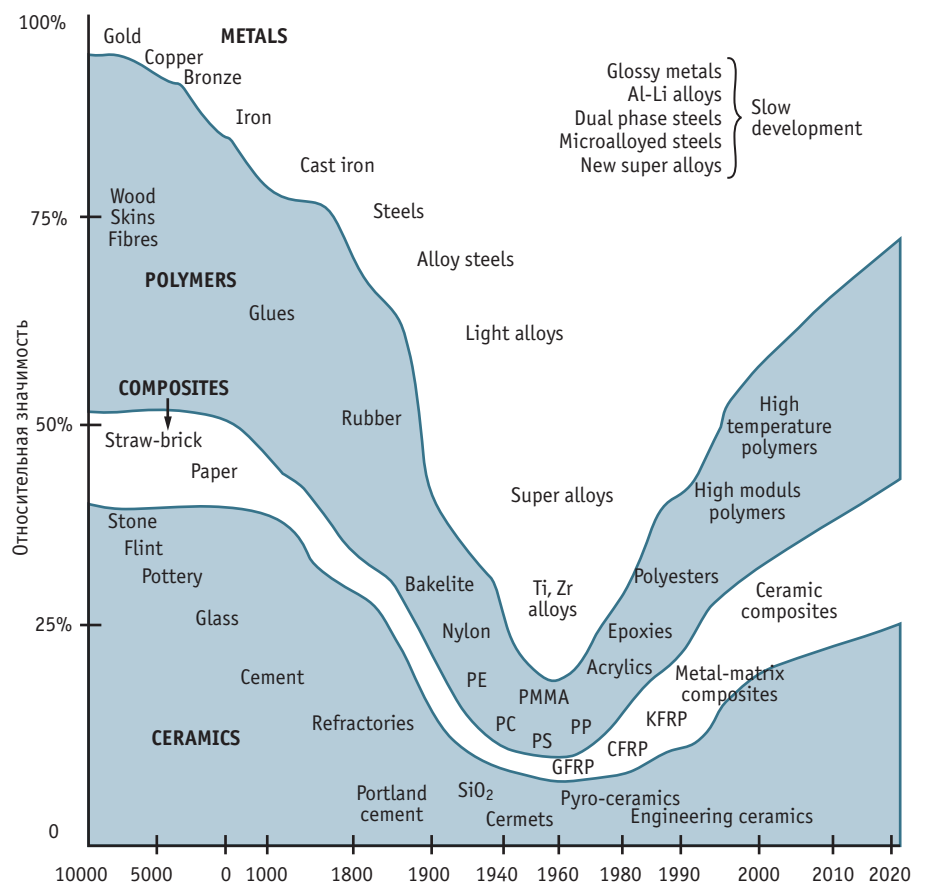


Рис. 1. Значимость материалов для различных периодов развития [1]

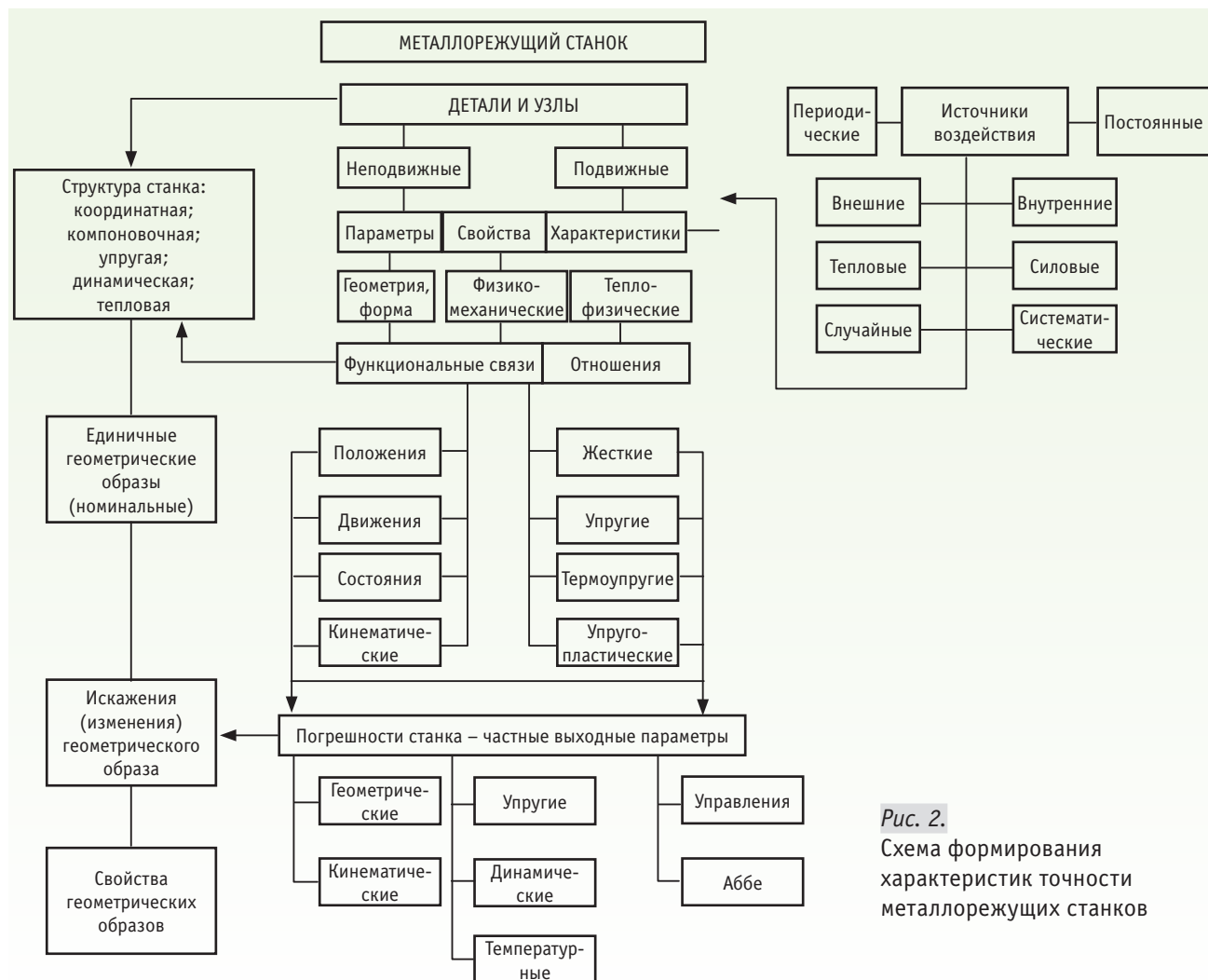


Рис. 2. Схема формирования характеристик точности металлорежущих станков

Развитие сложных технико-технологических систем, которыми являются металлорежущие станки, происходит в направлении достижения максимальной степени идеальности их функционирования, что происходит как в рамках совершенствования существующих конструктивных решений, так и при принципиальном изменении конструктивных решений на новых физических принципах, а также за счет всестороннего использования более глубоких свойств материалов. Это приводит к переходу на новый уровень структурных составляющих технико-технологических систем. Применение различных материалов в материальном производстве и исторический процесс их появления или создания, относительная степень и уровень их значимости в развитии индустриального производства иллюстрирует диаграмма рис. 1.

Металлорежущий станок при анализе точности рассматривается как система (рис. 2), состоящая из множества деталей и узлов, которые в соответ-

ствии с заданными и осуществляемыми функциями делятся на две группы: *неподвижные* и *подвижные*.

К ним относятся: станины, колонны, столы, салазки, каретки, направляющие, шпиндельные бабки и т.п., которые сами по себе в разных случаях могут быть как подвижными, так и неподвижными, фиксированными. Например, стол может быть как подвижным (с линейным перемещением или вращением), так и неподвижным, то есть фиксированным, или колонна также может быть как подвижной, так и неподвижной и т.д. Детали и узлы, в свою очередь, характеризуются присущими им параметрами, свойствами и характеристиками: геометрическими размерами и формой, физико-механическими характеристиками материала и его тепло-физическими свойствами и параметрами теплообмена с окружающей средой и сопряженными элементами станка.

Неподвижные и подвижные детали и узлы станка через функциональные связи и отношения образуют различные структуры металлорежущего стан-

ка, которые в зависимости от способа формирования их связей и отношений могут характеризовать и определять следующие структуры: координатную, компоновочную, упругую, динамическую, тепловую, термоупругую и др. (рис. 3).

Отношения между деталями и узлами, а также их связи определяют вид (характер) их взаимодействия: жесткий (неподвижный), упругий, термоупругий и упругопластический.

Изменения параметров, свойств, характеристик неподвижных и подвижных деталей и узлов, а также их функциональных связей и отношений происходят под воздействием источников их дестабилизации основных видов: силовые и температурные, которые могут быть как постоянными, так и периодическими, случайными и систематическими, внутренними и внешними.

Характеристики положения, движения геометрических объектов деталей и узлов металлорежущих станков могут быть описаны аналитическими зависимостями, которые определяют геометрические свойства их положения в пространстве.

С другой стороны, к *погрешностям состояния* относят отклонения, вызванные изменением состояния узлов и деталей станка вследствие статических и динамических воздействий на них силовых, тепловых и других видов энергии. К ним относятся, например, вибрации, упругие и тепловые деформации и т.п. Изменения состояния возникают вследствие силовых и тепловых воздействий (см. рис. 2), которые обуславливают изменение и приводят к искажению компоновочной, упругой, динамической, тепловой, термоупругой структуры станка, что в немалой степени зависит от свойств материала деталей станка, его геометрии и формы. Еще одним немаловажным фактором применения того или иного материала являются его технологические факторы производства, обеспечивающие достаточную простоту получения требуемой формы, размеров и свойств при требуемой экономической эффективности или целесообразности. Понятно, что закрытые сечения базовых неподвижных деталей, сварные или отлитые, дают преимущества в отношении статической и динамической жесткостей. Обнаружено, что оробрение является предпочтительным с точки зрения изгиба, а поперечные ребра сечения коробки приводят к наибольшей жесткости при кручении.

Точные расчеты деформаций сложных конструктивных элементов под нагрузкой очень сложны, длительное время они были невозможны в рамках существовавшего аналитического аппарата теорий упругости, колебаний и теплопроводности. Однако такая ситуация значительно изменилась с развитием и доступностью численных методов конечных элементов и удобством использования созданных на их основе программных средств.

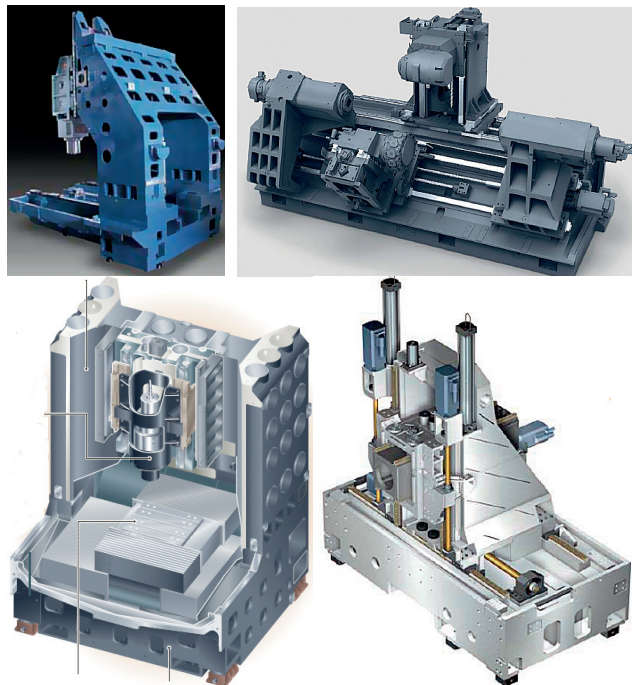


Рис. 3. Типовые структуры компоновок современных станков

В табл. 1 приведены характеристики материалов деталей станка, которые применяются (+), когда определяют его статическую, динамическую, тепловую и термоупругую жесткости.

Характеристики станка (статическая, динамическая, термическая жесткость, усталостная прочность, демпфирование, долговременная стабильность, малый вес) зависят от физических свойств используемых материалов, а также от расположения и формы компонентов. Что касается разнообразия доступных материалов, в металлорежущих станках и компонентах в основном можно увидеть металлические, гранитные, керамические, полимербетонные, пористые и армированные композитные материалы. Кроме того, применяются комбинации материалов и структуры гибридных материалов. Сварные конструкции базовых деталей приводят к снижению веса до 30% по сравнению с чугуном, но другие характеристики не изменяются в такой же пропорции в сторону их улучшения, а имеют разнонаправленный характер. Что касается направлений создания облегченной конструкции станка, то механические характеристики значения плотности, модуль Юнга, удельный модуль Юнга становятся более важными и значимыми (рис. 4). Легкая конструкция необходима для движущихся деталей и узлов, а базовые детали станка должны обеспечивать высокое демпфирование и жесткость. Даже при использовании мощных приводов высокая точность перемещений

Таблица 1. Влияние характеристик материала на параметры жесткости станка

Характеристики материалов	Статическая жесткость	Динамическая жесткость	Тепловая жесткость
	Теория упругости	Теория колебаний	Теория теплопроводности и термоупругости
Удельный вес ρ , кг/м ³	+	+	+
Предел прочности при сжатии, σ , Н/мм ²	+	-	-
Модуль упругости при растяжении – модуль Юнга, E кН/мм ²	+	+	+
Модуль упругости при сдвиге – модуль сдвига G , Н/мм ²	+	+	+
Коэффициент Пуассона, μ	+	-	+
Коэффициент демпфирования, ζ	-	+	-
Теплопроводность λ , Вт/м·°С	-	-	+
Теплоемкость, C , Дж/кг·°С	-	-	+
Коэффициент теплового расширения, β , 10 ⁻⁶ /°С	-	-	+

(вращений) не может быть достигнута при перемещении больших масс.

Что касается динамической жесткости станка – устойчивости к вибрации, важны статическая жесткость структуры станка и демпфирование. Коэффициент демпфирования (лог. декремент) материала трудно определить количественно, и разработчик станка должен, как правило, полагаться на эмпирические результаты. Демпфирование материала сильно зависит от состава сплава, частоты, уровня и типа напряжения (растяжение или сдвиг), темпе-

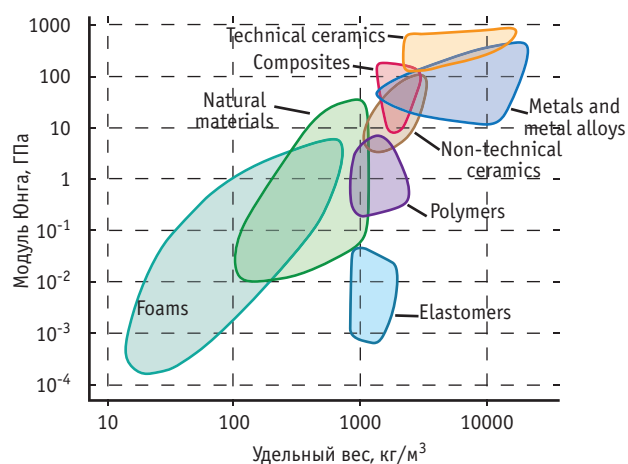


Рис. 4. Соотношение модуля Юнга и удельного веса материалов [3]

ратуры и предварительной нагрузки соединения. Благодаря механизмам трения и микроскольжения, структурные соединения деталей значительно способствуют демпфированию.

Очевидно, что теплофизические свойства материала (теплопроводность, удельная теплоемкость и коэффициенты теплового расширения) и тепловая жесткость конструкций оказывают существенное влияние на точность и производительность станков.

Чугун, сталь и другие металлические материалы по-прежнему являются наиболее часто применяемыми материалами в станках. Металлические конструкции также используются для создания различных гибридных и комбинированных структурных и конструктивных решений. Металлические компоненты необходимы как минимум для механических поверхностей, соединений, направляющих и подшипников. В традиционном проектировании конструкций станков конкуренция между сварными стальными конструкциями, стальным литьем и чугунными компонентами продолжает

есть. Общее правило проектирования предполагает применение отливок в крупносерийном производстве, а сварных конструкций – в мелкосерийном или единичном производствах (с точки зрения эффективности). Этим правилом достаточно часто пренебрегают станкостроители в силу обеспечения высокого технического уровня станков (чугун обеспечивает высокие характеристики, в том числе демпфирования, сварная стальная конструкция позволяет экономить материал и массу благодаря более высокому модулю Юнга, для отливок необходимо изготавливать дорогие формы и литейные стержни, чего можно избежать с помощью сварных конструкций). С другой стороны, сложные ребра и цельные структуры в настоящее время могут быть отлиты более легко, чем ранее (рис. 3).

Разнообразие стальных сплавов и чугунных материалов все еще быстро развивается. В зависимости от легирующих компонентов и термической обработки могут быть достигнуты различные физические свойства – пластичность, прочность. Марки стали классифицируются по национальным и международным стандартам: ГОСТ Р 54384-2011, DIN EN 10020, DIN EN 10027, SAE, ISO 4948.

Как правило, стальные детали из листового металла производятся сваркой. Из-за высокой температуры сварки могут возникнуть остаточные напряжения, изгиб и деформация детали. Это должно быть компенсировано последующими эта-

пами производства. Корпусные и базовые детали из листового металла также собираются с помощью болтовых и винтовых соединений. В этом случае результирующая статическая жесткость и демпфирование зависят от сопрягаемых поверхностей и напряжений болтовых соединений. Основные нагрузки внутри стальной конструкции, максимальный геометрический момент инерции в поле действия силы достигаются при соответствующем расположении листового металла. Это приводит к коробчатому типу или ребристым структурам. Детали из листового металла могут быть обработаны таким образом (например дополнительные окна и т.п.), чтобы уменьшить вес компонента и улучшить доступность.

Станкостроителями были исследованы и проанализированы основная геометрия ребер, их размещение и допустимые нагрузки. Известны подходы с использованием тонкостенных конструкций из листового металла для получения достаточно легких, но жестких компонентов, представляющих собой ячеистую структуру с направленной ориентацией, которая обеспечивает малую массу и высокую динамическую жесткость. Также используются трубчатые конструкции, сваренные пластинами для использования трения между металлическими листами с целью улучшения демпфирования (рис. 3).

Применяются и сэндвич-конструкции с различными основными структурами (сотовые, трубчатые, сетчатые), когда при той же жесткости на изгиб можно добиться экономии веса до 35% и более по сравнению с чугунными деталями. Сварные стальные конструкции часто используются в качестве оболочек для заполнения бетоном или минеральным материалом с целью усиления структурного демпфирования.

По сравнению со сталью чугун характеризуется более высоким процентным содержанием углерода. В зависимости от состава и термической обработки внутри материала формируются различные типы графита: пластинчатый, сферический и др., что обуславливает различные свойства чугуна. Образование пластинчатого графита приводит к более высоким значениям демпфирования материала и прочности на сжатие, но достаточно низкому пределу прочности на растяжение из-за внутренних дефектов. У чугуна с пластинчатым графитом связь между напряжением и деформацией является нелинейной. Сферический графит обеспечивает более низкое демпфирование материала, но более высокую прочность на разрыв и более высокую деформационную прочность. В основном прочность зависит от содержания углерода и типа кристаллической решетки. Хотя для стали модуль Юнга может быть точно указан, для чугуна область рассеяния обу-

словливается толщиной стенки и сценариями нагрузки. Хорошо известен способ усиления демпфирования чугунных деталей, заключающийся в том, чтобы удерживать песчаные сердечники внутри конструкции.

Даже сложные и ребристые конструкционные детали могут быть получены путем литья. Из-за высокой температуры литья и последующего охлаждения внутри отлитых деталей возникают остаточные напряжения. Отжиг, старение или вибрация применяются для снижения этих остаточных напряжений и достижения стабильности свойств деталей при эксплуатации станков.

В дополнение к свойствам статической и динамической жесткости (табл. 1), тепловая жесткость и тепловое поведение станков должны быть учтены в конструкции станка. Наиболее важными характеристиками материалов в этом случае являются теплопроводность, удельная теплоемкость и коэффициент теплового расширения (см. табл. 1). Для улучшения характеристик станков при конструировании применяют компоновку с различной структурой размещения ребер, кожухов, необходимыми толщинами стенок, применяются материалы с низким коэффициентом теплового расширения (чугун или, например, инвар), полые охлаждаемые конструкции (рис. 3) и др. В сверхточных станках требуются материалы с минимальным тепловым расширением. Часто применяемый инвар (сплавы системы Fe-Ni: 36% Ni, до 1% Mn, Si или углерода и до 5% Co, остальное – Fe) обеспечивает очень низкий или даже отрицательный коэффициент расширения.

Помимо стали и чугуна, в станочных конструкциях используются и другие металлические материалы. Сплавы легких металлов, в частности алюминиевые сплавы, имеют значительно более низкую плотность по сравнению со сталью и чугуном. В этом случае, массы движущихся деталей и узлов станка могут быть уменьшены, но с другой стороны, толщина стенок может быть увеличена, чтобы уменьшить локальные напряжения, сохраняя вес компонента и т.п.

Природные материалы, такие как гранит, ведут себя в соответствии с законом Гука, они антиманнитные, непроводящие, нержавеющей и не создают заусенцев. Гранитные рамы обеспечивают высокое демпфирование, низкую теплопроводность, низкое тепловое расширение и высокую долговременную стабильность благодаря отсутствию остаточных напряжений. Гранит – кристаллическая твердая горная порода, состоящая из кварца, слюды и полевого шпата. Его свойства различаются в зависимости от происхождения материала. С уменьшением размера зерна механические свойства повышаются. Мелкозернистый

гранит достигает модулей Юнга 65–113 Н/мм² и прочности на сжатие выше 180 Н/мм². Поскольку гранит – это природный материал, его механические характеристики имеют значительный разброс. Из-за высокой твердости (850–900 НV), стойкости к истиранию и однородной поверхности гранит подходит для аэростатических и гидростатических подшипников и направляющих. При проектировании с использованием гранита необходимы знания о методах обработки камня. Обработка преимущественно включает распиливание, сверление и шлифование. Путем шлифования можно достичь высокой прямолинейности и плоскостности. Гранит часто сочетается со вставками из стали (втулки, Т-образные пазы), которые обеспечивают механическое сопряжение. Таким образом, необходима совместная обработка обоих материалов. Путем притирки может быть достигнут необходимый размерный допуск. Благодаря применяемой технологии обработки, гранитные элементы состоят из призматических блоков.

Из-за своей микроструктуры твердый камень должен быть нагружен давлением. Свойства материала относительно растягивающих и изгибающих нагрузок намного ниже чугуновых и стальных. Поэтому поток силы внутри конструкции должен быть тщательно продуман в процессе проектирования. Для машин с высоким ускорением следует соблюдать соотношение в пределах 1:10 между перемещаемой и неподвижной массами. В основном применяется сочетание гранита со сталью. Тепловые свойства обоих материалов должны быть приняты во внимание, чтобы избежать изгиба и напряжений на границах раздела. Для сборки нескольких гранитных компонентов в основном применяются завинчивание и склеивание. Поскольку гранит может впитывать влагу, его часто герметизируют очень тонким слоем эпоксидной смолы. Несмотря на это, долговременная стабильность гранита ограничена.

Поскольку термическая стабильность, высокая статическая и динамическая жесткости и низкая масса являются ключевыми вопросами в высокоточных и сверхточных станках, то в некоторых случаях также используется керамика. Керамика – это неорганические материалы, в основном состоящие из металлов и металлоидов с ионной, но также ковалентной связью и различными сложными кристаллическими структурами. Керамика обладает достаточно низкими характеристиками хрупкости. Из-за микротрещин предел прочности на разрыв намного ниже, чем предел прочности при сжатии. Прочность на растяжение сильно зависит от количества внутренних разрушений и варьируется среди образцов одного и того же материала.

Желаемые свойства керамики достигаются путем высокотемпературной обработки (выпечки). Как правило, керамика обладает низким тепловым расширением. Многие керамические изделия обладают пористостью, поскольку изготавливаются на основе порошка. Из-за низкой плотности, высокого модуля Юнга и высокой твердости по сравнению с подшипниковой сталью, нитрид кремния (Si₃N₄) используется в гибридных подшипниках для высокочастотных шпинделей. Керамика типа SiC, Si₃N₄, Al₂O₃ обладает высокой устойчивостью к износу, коррозии и эрозии. Керамические детали имеют значительную неравномерную деформацию усадки. Вибропоглощение керамики невысокое. Ламинированное наращивание тонких керамических плиток является предпочтительным, так как, например, возможно снижение массы детали в 2–3 раза по сравнению с подобной же конструкцией из алюминия или стали с такой же жесткостью.

Полимербетонное или минеральное литье базируется на композитном материале, который получается путем смешивания наполнителя, такого как песок, мрамор, кварц, перлит, стекло, волокно, доломит, сталь или углеродные волокна, со смолой, такой как ненасыщенный полиэфир, полиметилметакрилат или эпоксидной смолой. Отверждение достигается путем полимеризации при добавлении катализатора или ускорителя при комнатной температуре. Тип и процентное содержание материала наполнителя и связующего агента значительно различаются в зависимости от применения. В станочных конструкциях преимущественно используется эпоксидная смола на минеральной основе для базовых деталей. Процесс литья происходит при комнатной температуре и требует иногда сложных и дорогих форм из дерева или металлов. Поскольку внешний нагрев не требуется, производство компонентов из минерального материала требует меньше первичной энергии по сравнению с чугуном или сталью.

Помимо высокого модуля Юнга, могут быть достигнуты высокие демпфирующие значения и низкое тепловое расширение, низкие остаточные напряжения, минимальная усадка и высокая воспроизводимость. Упрочнение в основном осуществляется с помощью отвердителя. В качестве наполнителей в машиностроении используются неорганические минеральные наполнители (кварц, гранит и базальт). В некоторых случаях применялись также гидроксид алюминия, карбид кремния, порошок железа или др. По сравнению со сталью и чугуном минеральное литье обеспечивает более низкий коэффициент теплового расширения, намного более низкую теплопроводность (1–3 Вт/м·°C по сравнению с 50 Вт/м·°C), но более высокую удельную теплоемкость. Таким

Таблица 2. Значения основных характеристик материалов

Характеристики материалов	Серый чугун	Сталь	Минеральное литье	Сверхпрочный бетон	Гранит	Углепластик
Применяемость в деталях станков/степень/потенциал	Станины, колонны, столы, корпус шп. бабки, направляющие/высокая/++	Станины, колонны, столы, направляющие/высокая/+	Станины, колонны (столы, направляющие)/средняя/++	Станины, колонны (столы, направляющие)/низкая/+	Станины, колонны (столы, направляющие)/низкая/+	Направляющие, столы, корпус шп. бабки (колонны)/низкая/++
Удельный вес ρ , кг/м ³	7,15	7,85	2,40	2,45	2,90	1,60
Предел прочности при сжатии σ , Н/мм ²	840	800	140	125	250	840
Модуль упругости при растяжении – модуль Юнга E , кН/мм ²	115	210	45	45	65	180
Модуль упругости при изгибе – модуль сдвига G , Н/мм ²	340	240	35	15	20	700
Коэффициент Пуассона, μ	0,25					
Коэффициент демпфирования (лог. декремент), ζ	0,0045	0,0023	0,0352	0,0385	0,015	0,030
Теплопроводность λ , Вт/м·°С	47	50	2,9	2,0	3,0	2,0
Теплоемкость C , Дж/кг·°С	535	360	730	750	800	1000
Коэффициент теплового расширения β , 10 ⁻⁶ /°С	9	12	15	11	6,5	0,1

способом могут быть изготовлены термически более устойчивые базовые детали станков. При этом из-за низкой теплопроводности могут возникать неоднородные температурные поля под воздействием внутренних источников тепла. Для гибридных конструкций необходимо избегать напряжений на границах раздела, что требует разработки минеральных отливок с коэффициентами теплового расширения, адаптированными к чугуну или стали. Стоимость деталей, отлитых из минерального сырья, зависит главным образом от уровня интеграции, степени комплектности, принципа изготовления и веса.

Таким образом, наилучшая статическая жесткость может быть достигнута для сварных стальных конструкций, заполненных минеральным материалом, а преимущественная динамическая жесткость обеспечивается сварными и литыми деталями, заполненными цементобетоном, кварцевым песком, связанным смолой, или песком, в зависимости от требуемой статической жесткости. В табл. 2. при-

ведены значения сводных [1–3] характеристик рассмотренных материалов, формирующих статическую, динамическую и тепловую жесткость станка (см. табл. 1).

Прогресс в исследованиях станков позволил определить облик металлорежущего инновационного станка, который синтезирует в себе направления развития составных элементов структуры станка [4, 5].

На рис. 5 приведена принципиальная структура инновационного станка будущего, свойства и характеристики которого определяются системой элементов, реализующих иные физические принципы взаимодействия, построение которых основано на одной из трех структур: трансформируемой, реконфигурируемой или бионической. Очевидно, что процесс достижения этой цели будет поэтапным и потребует соответствующих исследований и разработок на основе новых материалов, в том числе и материалов, реализующих иные физические явления.

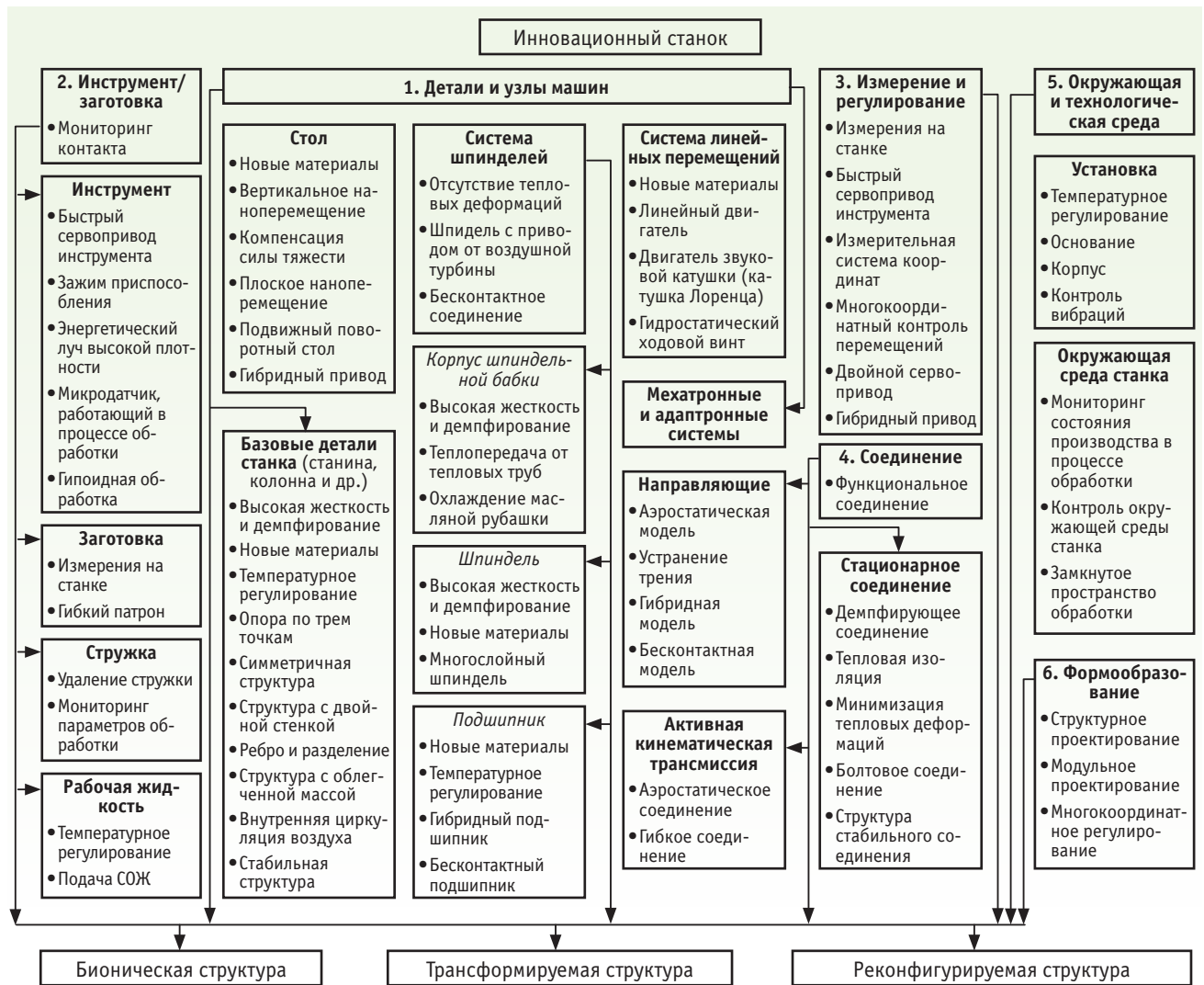


Рис. 5. Принципиальная структура инновационного станка и значение новых материалов в его развитии [4]

Инновационные области исследований – это так называемые интеллектуальные или умные материалы и конструкции, которые заключают в себе функциональные возможности сенсоров, датчиков и/или исполнительных механизмов. Функциональность привода означает изменение формы, положения, частоты или других механических свойств в зависимости от изменения температуры, электрических или магнитных полей. Наиболее часто используемые интеллектуальные материалы для приводов станков (см. рис. 5) – это сплавы с эффектом памяти формы, магнитоэлектрические материалы, пьезоэлектрическая керамика, электро- или магнитоэологические жидкости. Для датчиков используются оптические волокна и пьезоэлектрические материалы, а также некоторые полимеры. Такие материалы могут применяться для мониторинга процесса и состояния станка, активного воздействия на его дина-

мические и тепловые характеристики, а также для улучшения состояния процесса и управления им. Ведутся разработки и уже созданы элементы станка, которые полностью или преимущественно состоят из интеллектуальных материалов, представляют собой интеллектуальные структуры, объединяющие традиционные структуры с интеллектуальными элементами, такими как встроенные датчики или исполнительные механизмы [6, 7]. Соотношения основных физико-механических характеристик интеллектуальных материалов приведены на рис. 6–9.

Сплавы с эффектом памяти формы на основе никеля и меди (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni) обладают свойством после деформации возвращать первоначальную форму с повышением температуры. Эффект памяти формы основан на переходе между двумя различными кристаллическими структурами (аустенитная и мартенситная фазы при

охлаждении). Обзор исследований и технических применений сплавов с эффектом памяти формы приведен в работах [6, 7]. В станках они нашли применение для зажима инструмента, для управления предварительным напряжением шариковых передач, в линейных приводах – для небольших станков и приводах прессового оборудования (рис. 10).

Основными характеристиками сплавов с эффектом памяти формы, как это следует из сравнительного анализа рис. 7–9, являются:

- *чувствительность* – способность реагировать на изменения в температурном поле;
- *переключаемость* – при достижении температуры фазового превращения осуществлять переключающие операции;
- *активация* – способны создавать большие смещения (обратимая пластичность или псевдоупругость) и значительные активные/реактивные напряжения;

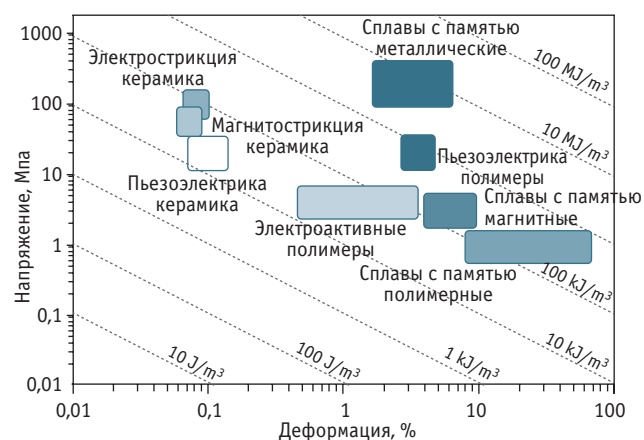


Рис. 6. Схема соотношений напряжение – деформация и удельной энергии активных материалов и диапазон их применения для приводов на их основе

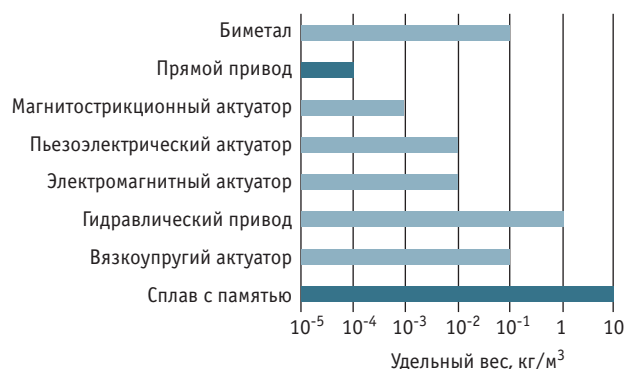


Рис. 7. Сравнительная удельная работа актуаторов на основе различных физических явлений

- *адаптивность* – основана на фазовых превращениях (мартенситного типа), проявляется в различного рода уникальных свойствах (самоорганизация, самозалечивание, самоконтроль и т.п.);
- *память и восстановление* – форма и внутренняя структура могут запоминаться и многократно восстанавливаться;
- *энергоёмкость и преобразование энергии* – может запасаться значительное количество энергии и затем преобразовываться в механическую энергию деформации;
- *демпфирование* – большинство сплавов с ЭПФ имеет высокие демпфирующие свойства, обусловленные особенностями микроструктуры и фазовыми превращениями.

Пьезоэлектрическая керамика генерирует электрическое поле, когда она деформирована. Часто используемыми керамическими пьезоматериалами являются титанат бария ($BaTiO_3$), титанат свинца ($PbTiO_3$), титанат цирконата свинца и ниобат калия ($KNbO_3$). Пьезоэлектрическая керамика является наиболее часто используемым

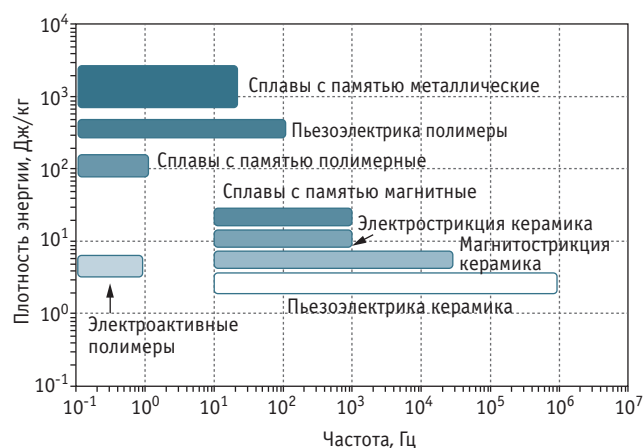


Рис. 8. Диаграмма частотных диапазонов применения различных активных веществ



Рис. 9. Обобщенные сопоставимые качественные характеристики материалов и сплавов

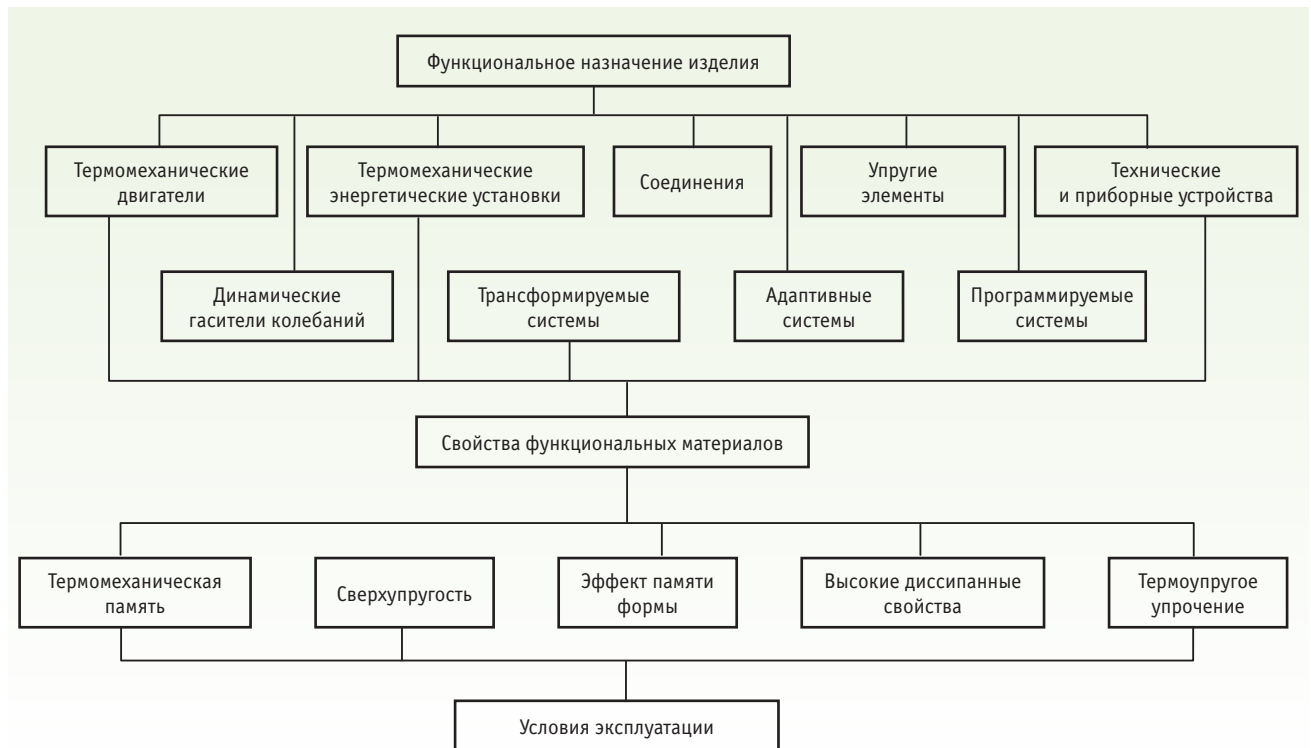


Рис. 10. Классификация устройств из материалов с эффектом памяти формы

материалом в мехатронных устройствах для станков. Применения пьезопроводов варьируются от устройств точного позиционирования до систем активного контроля вибрации. Пьезокерамика обладает низким отношением удлинения к размеру, но высокой плотностью мощности и жесткостью.

Магнитострикционные материалы изменяют свою форму под воздействием внешнего магнитного поля из-за вращения магнитных доменов, которые вызывают внутренние деформации в структуре материала. Наиболее часто используемым эффектом является расширение ферромагнитного стержня по отношению к продольному магнитному полю.

Выбор материала, разработка материала с заданными свойствами, комбинирование материалов в конструкциях дают много возможностей для развития станков. История развития и применения станков дали большой опыт по применяемым материалам и конструктивным решениям, позволяющим извлекать уроки из эксплуатации материалов в конкретных применениях в станках. Тем не менее постоянно проводятся исследования с новыми материалами, использующие нетрадиционные подходы и изобретения, которые могут обеспечить лучшие технико-технологические, эксплуатационные и экономические свойства и характеристики станков при их применении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dobrzanski L. A.** Significance of materials science for the future development of societies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. P. 1–16.
2. **Möhring H.-C.** et al. Materials in machine tool structures. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2012. p. 725–748.
3. **Ashby M. F.** Multi-Objective Optimisation in Material Design and Selection. *Acta Materialia*. 2000.
4. **Кузнецов А. П.** Точность металлорежущих станков в ее историческом развитии. Ч. 2. // *СТАНКОИНСТРУМЕНТ*. 2017. № 4. С. 14–21.
5. **Бушуев В. В., Кузнецов А. П., Сабиров Ф. С., Хомяков В. С., Молодцов В. В.** Состояние и направления развития научных исследований в станкостроении // *СТИН*. 2015. № 11. С. 12–20.
6. **Крахин О. И., Кузнецов А. П., Косов М. Г.** Материалы с термомеханической памятью в станкостроении. — М.: ВНИИТЭМР, 1988. 54 с.
7. **Крахин О. И., Кузнецов А. П.** Сплавы с памятью и их применение в технике. — М.: Янус-К, 2010. 212 с.

КУЗНЕЦОВ Александр Павлович –

доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»