Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Машинобудівний факультет
Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Доброскок В.Л.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

з дисципліни «Спеціальні технології інструментального виробництва»

Харків

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. ЦЕЛЕВЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ 5
1.1. Деление-дозирование материала 5
1.2. Соединение 6
1.3. Формообразование 6
1.4. Изменение физико-механических и химических свойств 7
1.5. Размерная обработка деталей 8
1.6. Финишная обработка поверхности деталей 9
1.7. Сборка 1
1
1.8. Испытание машин 1
1
2. ТЕНДЕНЦИИ, ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ 1 3
2.1. Тенденции развития методов обработки материалов резанием 1
3
2.2. Принципы и методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием 1 4
3. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ 1 6
3.1. Принципы систематики 1
6
3.2. Комплекс энергетических признаков 1
7
3.2.1. Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту 1
7
3.2.2. Энергия, определяющая образование формы 2
1
3.2.3. Распределение энергии во времени 2
3
3.2.4. Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом 2 4
3.2.5. Энергоемкость процесса формообразования 2
4
3.3. Комплекс технологических признаков 2

3.3.1. Вид среды обработки 25
3.3.2. Давление среды обработки 25
3.4. Комплекс инструментальных признаков 26
3.4.1. Конструктивные элементы инструмента 26
3.4.2. Конструктивные признаки инструмента 27
3.4.3. Соотношение процессов резания и пластического деформирования 28
3.4.4. Виды рабочих движений инструмента 29
3.4.5. Характер рабочих движений инструмента 30
3.4.6. Скорость рабочих движений инструмента 31
3.4.7. Жесткость рабочей части инструмента 31
3.5. Комплекс признаков формообразования 32
3.5.1. Классификация формообразующих поверхностей деталей 32
3.5.2. Элементы теории формообразования 36
3.5.3. Метод размерного формообразования 37
3.5.4. Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование 39
3.5.5. Характер формообразования 40
3.5.6. Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования 40
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ 42
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 43

ВВЕДЕНИЕ

Главная задача машиностроения — обеспечить все отрасли народного хозяйства высокоэффективными машинами, оборудованием и рабочими процессами.

Процесс создания машины состоит из двух этапов — проектирования и технологической подготовки производства, включая организацию и изготовление.

Этап проектирования включает в себя конструирование, изготовление опытных образцов, испытание и соответствующую корректировку конструкторской документации. Этап технологической подготовки и организации производства включает в себя разработку технологических процессов изготовления и контроля деталей, сборки машин и их испытание.

В задачи подготовки производства входит также конструирование технологического оборудования, инструмента и оснастки, разработка методов организации и управления производством.

Проблемы конструирования тесно связаны с технологической подготовкой производства. При конструировании важной задачей является обеспечение технологичности конструкции машины, что требует совместной работы конструктора и технолога.

При недостаточно высоком уровне технологии машиностроительного производства необходимо затрачивать больше труда, энергии и средств, а из-за несовершенного технологического оборудования — больше времени и средств на изготовление изделий, что существенно снижает эффективность работы предприятий. Поэтому совершенствование технологических процессов изготовления деталей, сборки и контроля, создание нового прогрессивного технологического оборудования, оснастки, инструмента представляет собой одну из главных народнохозяйственных задач.

Расширение масштабов производства промышленной продукции, развитие и совершенствование конструкций машин, механизмов и приборов на основе новых достижений науки и техники вызывают повышение требований к точности, надежности и долговечности исполнительных механизмов и машин и, как следствие, необходимость создания новых способов обработки и контроля качества деталей и процессов сборки. Трудоемкость технологических процессов существенно возрастает и все более актуальными становятся технологические проблемы производства.

1. ЦЕЛЕВЫЕ РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Применяемые на предприятиях процессы обработки материалов, начиная от заготовки до получения готового изделия, можно классифицировать на следующие целевые рабочие процессы: деление-дозирование, соединение, формообразование, изменение физико-механических и химических свойств материалов, размерная обработка, финишная обработка поверхностей, сборка и испытания.

Для достижения заданного качества при выполнении целевых рабочих процессов необходимым условием является проведение контрольных операций, которые следует рассматривать как составную часть выполняемого целевого рабочего процесса.

Классификация рабочих процессов изготовления деталей по целевому назначению предложена Т.Н. Лоладзе [1].

В основе выполнения целевых рабочих процессов обработки деталей лежит использование следующих физико-химических явлений: оплавления, пластической деформации, хрупкого и пластического разрушения, диффузии, адгезии, растворения, фазовых превращений, химических и электро-физико-химических реакций, а также их комбинация и интеграция.

1.1. Деление-дозирование материала

Деление-дозирование материала — целевой рабочий процесс в результате осуществления которого от некоторой массы материала отделяется объем, соответствующий объему требуемой детали с учетом необходимого припуска под дальнейшую обработку.

Дозирование материалов осуществляется путем деления проката на мерные заготовки, взвешиванием порошков, разливкой жидкого материала в емкости определенного объема и др.

Процессы деления, выполняются путем пластического или хрупкого разрушения материалов (рубка с помощью ножей на прессах и гильотинах, деление гладкими вращающимися дисками и т. д.), удалением материала из зоны деления резанием, оплавлением и химическим растворением (резка пилами, ножовочными полотнами, резцами, абразивными кругами, газовым пламенем, плазменной струей, анодно-механическим способом и др.).

1.2. Соединение

Соединение — целевой рабочий процесс, с помощью которого из отдельных частей образуется готовая деталь или заготовка детали, требующая

дальнейшей обработки.

К процессам соединения материалов относятся различные способы сварки (электродуговая, электрошлаковая, трением, газовая, диффузионная, электроннолучевая, лазерная и др.), пайки, склеивания, клепки и др. В технологическом процессе изготовления деталей этот процесс применяется для соединения заготовок, из которых изготавливается деталь. При сборке эти же процессы применяются с целью получения подузлов и узлов. Поэтому соединение следует рассматривать как отдельный рабочий процесс и при изготовлении деталей, и при сборке.

1.3. Формообразование

Формообразование — целевой рабочий процесс, при осуществлении которого материал принимает форму заготовки с учетом припуска под дальнейшую обработку или окончательные размеры, если удовлетворяется заданная точность и качество поверхности детали.

Агрегатное состояние материала до и после формообразования может быть различным, поэтому в этих случаях имеет место совмещение процессов формообразования и изменения физико-механических свойств.

Методы формообразования деталей многообразны и осуществляются:

– перераспределением материала в жидком состоянии (литье в земляные формы, кокили, литье по выплавляемым моделям, центробежное литье, электрошлаковый переплав и т. д.);

– перераспределением материала путем пластической деформации (ковка, штамповка, прокатка, гибка, прессование, выдавливание, волочение, накатка, чеканка и др.);

– компактированием порошка (прессование, выдавливание и другие способы порошковой технологии);

– удалением материала резанием (точение, строгание, фрезерование, сверление, протягивание, шлифование и т. д.);

– удалением материала оплавлением, испарением и растворением (электроимпульсная и электроискровая обработка, обработка электронным лучом, плазменной струей, лазером, химическое травление и др.);

– нанесением материала путем наплавки, нанесением порошка с дальнейшим компактированием и др.

Формообразование изделий нанесением материала относится к интегрированным генеративным (аддитивным) технологиям и достаточно полно представлено в [2].

1.4. Изменение физико-механических и химических свойств

Изменение физико-механических и химических свойств — целевой рабочий процесс, в результате осуществления которого весь обрабатываемый материал заготовки или только ее поверхностные слои приобретают заданные физические, механические и химические свойства (твердость, прочность, устойчивость к химическим воздействиям и т. д.).

Характерно, что при этом в ряде случаев происходит изменение размеров и формы обрабатываемой заготовки, вызывающее необходимость последующей уточняющей обработки.

К процессам, изменяющим физико-механические и химические свойства материалов, относятся: термообработка (отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение и др.), термомеханическая обработка, при которой происходит совмещение механической обработки с термической обработкой и др.

При выполнении процессов; деления, соединения, формообразования методами давления, литья и прессования порошка, изменения физико-механических и химических свойств материалов возникают технологически «наследственные» погрешности размеров и формы и дефекты поверхностных слоев.

При выполнении процессов соединения возникают неравномерная усадка и внутренние напряжения, вызванные нагревом и оплавлением граничных слоев заготовок деталей. Кроме того, в большинстве случаев невозможно с требуемой точностью осуществить совмещение осей и поверхностей соединяемых элементов заготовок. Все это ограничивает точность размеров заготовок и получение нужного качества поверхности.

Формоизменение материалов методами давления в большинстве случаев проводят в нагретом состоянии с целью понижения сопротивления пластической деформации и повышения податливости материала. Однако при высоких температурах вследствие взаимодействия поверхности заготовок с внешней средой образуются окалина, обезуглероженные слои и другие поверхностные дефекты. Кроме того, при остывании заготовок происходит неравномерное охлаждение и искажение формы. В результате точность, достигаемая при обработке материалов давлением в нагретом состоянии, при остывании снижается и это обстоятельство, со своей стороны, вызывает необходимость увеличения припуска под дальнейшую обработку.

При формообразовании деталей методами литья еще в большей степени проявляются погрешности, вызванные неравномерной усадкой материала в процессе кристаллизации и охлаждения, а на поверхности образуются дефектные слои в виде литейной корки.

При выполнении рабочих процессов изменения физико-механических и химических свойств материалов также возникают искажения формы заготовок

вследствие нагрева и охлаждения и возникновения внутренних напряжений.

Технологически «наследственные» погрешности размеров и формы и дефекты поверхностных слоев, возникающие при выполнении процессов деления, соединения, формообразования, изменения физико-механических и химических свойств материалов столь значительны, что для обеспечения заданной точности размеров и качества поверхностных слоев деталей необходимо применять дополнительные уточняющие процессы в виде размерной и финишной обработки поверхностей.

1.5. Размерная обработка деталей

Размерная обработка деталей — целевой рабочий процесс, при котором в результате удаления припуска обрабатываемая заготовка получает близкие к заданным или окончательные размеры и форму, с учетом удаления или нанесения материала при финишной обработке поверхности.

После предварительного формообразования припуски на последующую обработку существенны и составляют заметный процент массы готовой детали. Достижение необходимой точности обработки методически осуществляется путем многоразовой обработки с постепенным удалением припуска. При этом с каждым переходом снимаемый припуск уменьшается, в результате чего снижаются силы и деформации системы, величина случайных и систематических погрешностей, возникающих в процессе обработки.

Размерная обработка материалов традиционно осуществляется процессами резания на металлорежущих станках, а также электрофизическими, электрохимическими и химическими методами удаления припуска. При этом высокая точность обработки деталей достигается обеспечением сравнительно малых действующих сил и деформаций системы при незначительной разности температур между обрабатываемой деталью и окружающей средой.

При обработке деталей на токарных, фрезерных, расточных и других станках достигаются 9÷11 квалитеты точности обработки и шероховатость поверхности R_a = 10÷1 мкм. Обработка деталей по 8÷5 квалитету точности при шероховатости R_a = 1÷0,08 мкм обычно производится на шлифовальных, координатно-расточных и других прецизионных станках, где действующие силы составляют доли ньютона, а деформации системы — микрометры и доли микрометров.

При электрохимических и электрофизических методах размерной обработки действующие силы незначительны, так как удаление припуска происходит путем оплавления или растворения микрообъемов материала. Это позволяет снизить погрешности, однако при этом из-за оплавления материала и

последующей кристаллизации образуются дефектные поверхностные слои. Поэтому и эти способы приходится делить на предварительные и чистовые.

К размерной обработке материалов могут быть отнесены также и некоторые специальные методы обработки давлением (ротационная ковка, прецизионная прокатка, ротационное выдавливание, обкатка или накатка, экструзионное выдавливание и др. методы). В вышеуказанных способах размерной обработки давлением обеспечивается локальный контакт инструмента с обрабатываемой заготовкой или малые обжатия материала, а также уравновешивание сил аналогично тому, как это происходит в протяжных станках для внутреннего протягивания, что позволяет получать относительно высокую точность обработки.

Поскольку размерная обработка осуществляется поэтапно, то принято делить ее на следующие виды: предварительная, получистовая и чистовая размерная обработка.

К процессам размерной обработки относятся: точение, фрезерование, сверление, протягивание, электроимпульсная и электроискровая обработка, шлифование и др.

Следует подчеркнуть, что трудоемкость размерной обработки в машиностроении и приборостроении чрезвычайно высока и составляет 30÷60% от общей трудоемкости изготовления деталей.

Вопросы размерной обработки деталей резанием достаточно полно представлены в [3].

1.6. Финишная обработка поверхности деталей

При размерной обработке деталей способами резания, наряду с достижением точности, обычно удаляются дефектные поверхностные слои, возникшие на предыдущих операциях, снижается шероховатость и повышается качество поверхности, т. е. процессы размерной обработки во многих случаях совмещают в себе и процессы отделки поверхности.

Однако, если требуется получить шероховатость R_a = 0,02÷0,01 мкм, то в этом случае оказывается необходимым применять такие способы обработки поверхности, как доводка, тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование, притирка и др. Наряду с этим имеются случаи, когда заданная точность невысока, но необходимо получить высокий класс шероховатости поверхности, либо придать ей особые свойства (износоустойчивость, кислотоупорность, антикоррозионность и др.). В этих случаях, наряду с вышеуказанными способами, применяются процессы упрочнения деталей поверхностно-пластическим деформированием, нанесение покрытий и др., при которых происходит изменение качества поверхности,

придаются ей необходимые свойства, а размеры в большинстве случаев остаются в пределах поля допуска.

Финишная обработка поверхности — целевой рабочий процесс, в результате выполнения которого достигается необходимое качество поверхности деталей. Отличительной чертой этого рабочего процесса является незначительное изменение геометрических размеров детали в пределах поля допуска. Финишная обработка поверхности обычно является завершающей операцией технологического процесса изготовления деталей.

К финишным операциям относятся: тонкое точение и растачивание, алмазное выглаживание, тонкое шлифование, суперфиниширование, хонингование и др.

Очевидно, что достижение высокой точности и качества поверхности и впредь будет являться важной проблемой развития технологии машиностроительного производства.

В настоящее время активно развиваются процессы микро- и нанорезания [3]. Обработка с точностью 0,01 мкм (10 нм) ÷ 0,001 мкм (1 нм) считается ультрапрецизионной. Традиционная обработка (точение, фрезерование) может достигать точности в диапазоне 10÷100 мкм, а нанообработка — выше диапазона точности ультрапрецизионной обработки до атомарной.

В общем случае нанообработку можно классифицировать по четырем группам.

• Обработка лезвийным и абразивно-алмазным инструментом. Она реализуется с применением закрепленных режущих элементов, которые обеспечивают точную форму обрабатываемых поверхностей. Съем материала минимизирован до десятков нанометров. Сюда относятся алмазное точение, микрофрезерование, нано- и микрошлифование, хонингование, суперфиниширование и др.

• Нанообработка свободным абразивом. При реализации используются свободные абразивные микро- и нанозерна. Единичные, не связанные зерна (в составе паст или суспензий) снимают малые объемы обрабатываемого материала. Сюда относятся доводка, полирование и др., при этом существенную роль играют химические процессы воздействия на обрабатываемый материал.

• Немеханическая нанообработка. К этой группе относятся способы электроионные, микроэлектроразрядные, лазерные и др.

• Литографические способы. Реализуются с использованием масок для точного направленного воздействия на поверхность детали.

Из этих способов обработки наибольшие преимущества имеет механическая обработка, которая гарантированно обеспечивает точность

изготовления трехмерных объектов до нанометрических характеристик точности и качества поверхности.

Исследования в этой области будут понуждать развитие и интегрировать целый спектр наук в силу междисциплинарной природы нанотехнологий.

1.7. Сборка

Сборка машин — целевой рабочий процесс, заключающийся в соединении готовых деталей, сборочных единиц и агрегатов в определенной последовательности, в результате чего получают готовую машину или механизм, отвечающие установленным требованиям.

Процесс сборки является завершающим этапом, от которого в значительной мере зависит качество выпускаемой продукции.

В настоящее время в единичном и серийном производстве трудоемкость сборочных работ в среднем составляет 40÷60% от всей трудоемкости изготовления изделия, а в массовом производстве — около 20%. На машиностроительных заводах основная часть сборочных операций выполняется вручную. Поэтому сборочное производство обладает крупными потенциальными резервами для снижения материальных и трудовых затрат и повышения качества и надежности.

Рабочий процесс сборки по характеру и технологической сущности выполняемых работ связан с относительными перемещениями и ориентацией соединяемых деталей и сборочных единиц.

Деталь является составляющим звеном в кинематической цепи машины. Все размеры в машине, сборочные единицы и детали находятся в определенной взаимосвязи друг с другом, изменение одного из размеров может существенно влиять на другие, а также на работоспособность машины в целом.

1.8. Испытание машин

Испытание машин следует рассматривать как целевой рабочий процесс, заключающийся в экспериментальном определении конструктивных и эксплуатационных свойств подузлов, узлов и машины в целом для выявления их соответствия техническим требованиям. Основное назначение испытаний — обеспечение заданного качества продукции.

Испытание машин проводится на предприятиях, а также в процессе их эксплуатации. В заводских условиях испытание машин проводится при создании новых конструкций, а также при их производстве, при этом испытываются отдельные подузлы, узлы, агрегаты, системы управления и др. раздельно или же изделия в целом.

Испытания являются составной частью производственного процесса

изготовления машин. Например, на станкостроительных заводах испытание металлорежущих станков включает в себя проверку точности движения рабочих органов, легкости управления (эргономики), плавности хода, исследование усилий в механизмах подачи, реверса и др., измерение мощности на шпинделе станка, определение производительности.

Целевой рабочий процесс испытания машин в зависимости от вида изделий имеет различную трудоемкость, которая может изменяться от единиц до десятков процентов общей трудоемкости изготовления изделия.

2. ТЕНДЕНЦИИ, ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

2.1. Тенденции развития методов обработки материалов резанием

К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей.

По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т. д. в различном их сочетании.

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и создание на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов.

Отмечается стремление к существенному повышению скорости резания и микрорезания (скоростная, сверхскоростная обработка); дальнейшее развитие нетрадиционных методов обработки. Определенное влияние на совершенствование методов обработки оказывает развитие интегрированных технологий.

Многообразие разработанных и применяемых в технологии машиностроения методов обработки, необходимость решения вопросов автоматизации технологического проектирования ставят задачу систематизации имеющихся в этой области сведений. Известно, что одни и те же детали могут быть обработаны по различным технологическим схемам, при многовариантном сочетании методов обработки.

В связи с этим представляет интерес систематизация и схематизация существующих методов обработки, выявление общих характерных признаков и классификация их на этой основе в соответствующие группы и классы. Такое построение значительно упрощает изучение и использование методов обработки, полнее выявляет их взаимосвязь и возможности совершенствования и развития. Классификация методов обработки создает предпосылки для их

формализации и алгоритмизации, что является важным условием автоматизации технологического проектирования. Кроме того, разработав основные принципы построения и развития методов обработки, можно перейти от описательного метода изложения и изучения методов обработки к изучению методологии, основ их разработки.

2.2. Принципы и методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя [4]. Метод обработки определяется видом используемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и др.), производительностью, сущностью процесса формообразования (например, со съемом материала или пластическим деформированием), типом применяемого инструмента или обрабатывающей среды и их характеристиками, кинематикой процесса и его схемой. Изменение одного из перечисленных факторов вызывает изменение в названии и содержании метода обработки.

Создание интегрированных методов обработки основывается на одновременном или последовательном использовании различных видов энергии и вызываемых ими соответствующих физических эффектов [5], способов подвода в зону обработки, совмещения воздействия различных инструментов, комбинирования кинематических схем [6].

Рациональное использование интегрированных методов обработки приводит к повышению, как производительности обработки, так и качества детали. Кроме того, в ряде случаев освоение интегрированных методов обработки позволяет достигнуть новых технических результатов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей, а также достичь синергетического эффекта проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

• **Принципы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием**:

– принцип усложнения кинематики для повышения выходных показателей процесса;

– принцип совмещения различных процессов в пространстве и во времени;

– принцип рационального комбинирования различных процессов;

– принцип введения дополнительной энергии в базовые процессы механической обработки;

– принцип восстановления режущих свойств инструмента в процессе работы;

– принцип желательности достижения синергетического эффекта проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

Главный критерий при разработке или выборе интегрированного процесса обработки — повышение эффективности по всем основным показателям или отдельным — лимитирующим (производительность, качество, себестоимость, эксплуатационные характеристики, конкурентоспособность).

• **Методы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием** (примеры соответствуют интегрированным процессам, рассмотренным в [19]):

– использование дополнительного теплового воздействия (например, резание с искусственным нагревом);

– использование дополнительного механического воздействия (например, резание с опережающим пластическим деформированием);

– конструктивное совмещение в одном инструменте элементов различного функционального назначения (например, совмещение в одном инструменте режущих и деформирующих элементов);

– усложнение кинематики для повышения выходных показателей процесса (например, резание с интегрированной кинематикой);

– совмещение по времени различных процессов с унаследованием новых свойств инструмента (например: резание с предварительной приработкой режущего инструмента; резание инструментом с износостойкими покрытиями);

– использование дополнительного вибрационного воздействия (например: алмазное шлифование с вибрациями; виброабразивная обработка);

– введение дополнительной электрической энергии в зону шлифования (например: алмазно-искровое шлифование; силовое электроалмазное шлифование);

– использование нетрадиционных видов энергии для формирования абразивных инструментов и управления процессом обработки (магнитно-абразивная обработка; резание материалов сверхзвуковыми струями жидкости с примесями абразивов);

– управления режущей способностью абразивных инструментов в процессе шлифования (пример, алмазное шлифование с управлением рабочей поверхностью кругов).

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

3.1. Принципы систематики

Отличительные признаки различных интегрированных технологий механической обработки основываются, в первую очередь, на физико-химических и технологических особенностях процессов снятия припуска и формирования обработанной поверхности деталей.

В настоящее время по принципу интеграции механической обработки с дополнительным физико-химическим воздействием на процесс удаления припуска создано и достаточно успешно реализовано большое количество технологий. Их перечень гораздо шире, чем число относимых непосредственно к обработке материалов резанием. Имеется практическая необходимость в использовании комбинированных (комплексных) способов эффективной обработки материалов резанием и пластическим деформированием непосредственно на металлообрабатывающих станках.

Поэтому представляется целесообразным и необходимым разработать классификацию интегрированных процессов обработки материалов резанием на более широкой основе, тем более, что существующая ограниченная классификация, в настоящее время характеризует лишь занятую технологическую нишу в различных отраслях производства, не является исчерпывающей, а разнообразие способов обработки требует осознанного выбора той или иной технологии.

Представленная классификации интегрированных процессов резания материалов основана на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования. Предлагаемая классификация позволит приблизить понятие «интегрированные процессы резания» к разряду существующих технологических процессов изготовления, используя для этого подходы и критерии, принятые в машиностроении. Добавление признаков, определяемых спецификой рассматриваемых процессов, даст возможность более полно оценить технологические возможности интегрированных технологий и отдельных способов их реализации.

На основе проведенного анализа интегрированных процессов механической обработки, прежде всего процессов обработки материалов резанием, выделены комплексы признаков — энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих. В рамках этих комплексов классификационные признаки разбиты на 18 групп, каждая из которых содержит от 3 до 12 признаков. Часть их заимствована [2, 7] с добавлением или изменением отдельных показателей признаков.

3.2. Комплекс энергетических признаков

В первую очередь обращено внимание на энергетический аспект процессов. В энергетический комплекс признаков включено 5 групп:

– вид энергии, непосредственно подводимой к объекту;

– энергия, определяющая образование формы;

– распределение энергии во времени;

– подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом;

– энергоемкость процесса формообразования.

3.2.1. Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту

Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к объекту или на границе объекта и окружающей среды:

1.1 – механическая (энергия механического движения и взаимодействия тел или их частей);

1.2 – тепловая (энергия, связанная с движением атомов, молекул или других частиц, из которых состоит какое-либо вещество);

1.3 – электрическая (энергия электромагнитного поля, слагающаяся из энергии электрического поля и энергии магнитного поля);

1.4 – магнитная (энергия магнитного поля);

1.5 – электростатическая (потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов);

1.6 – химическая (энергия системы из двух или более реагирующих между собой веществ);

1.7 – лучевая (лазерная — энергия лазерного луча; светолучевая — энергия светового луча видимого света);

1.8 – ядерная.

Объектом могут являться: обрабатываемая деталь (заготовка); инструмент; зона непосредственного контакта инструмента с деталью.

Во всех случаях применительно к интегрированным процессам резания обязательным условием является наличие подвода исходной механической энергии. Дополнительный подвод различных видов энергии может существенно повышать выходные показатели процесса.

Примеры использования дополнительных видов энергии.

• ***Механическая энергия***.

Резание с опережающим пластическим деформированием [8]. Резание с опережающим пластическим деформированием(ОПД) обеспечивает улучшение

условий стружкообразования путем рационального изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя вследствие его упрочнения до процесса срезания. Упрочнение осуществляют накатным устройством, создающим глубину и степень наклепа, необходимые для получения максимальной эффективности последующего процесса резания. Энергия подводится к заготовке.

Ультразвуковое резание [8]. Ультразвуковыми методами обработки называют способы, использующие ультразвуковые колебания; они могут применяться в качестве основного воздействия для снятия, материала (например, размерная ультразвуковая обработка) или в сочетании с другими видами воздействия (механическими, электрическими, химическими) как средство интенсификации какого-то другого метода обработки (например, механические, электрохимические или другие виды обработки с наложением на инструмент вибраций ультразвуковой частоты). Ультразвуковые колебания наиболее широко применяют для размерной обработки твердых и сверхтвердых материалов по любому сложному профилю, для очистки, пайки, дефектоскопии и других технологических процессов, а также для улучшения процессов обработки резанием. Ультразвуковыми называют упругие механические колебания с частотой, равной или выше 16÷18 кГц. При ультразвуковом резании энергия подводится к инструменту.

Абразивная обработка шлифованием и хонингованием с наложением вибраций [8]. Подвод механической энергии в виде колебаний к обрабатываемой детали, инструменту или СОТС улучшает эти операции. Это объясняется повышением равномерности загрузки отдельных абразивных зерен, лучшим доступом СОТС и удалением продуктов обработки.

Повышение интенсивности съема металла при абразивной обработке с вибрациями объясняется постоянной сменой рабочих граней, скоростей и углов резания, большим динамическим взаимодействием зерен и обрабатываемого материала, а также увеличением плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это ведет к снижению действующих сил и температур, а следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности; при этом ликвидируются самоотпуск материала поверхности детали, микротрещины, интенсивный наклеп.

• ***Тепловая энергия.*** *Резание с нагревом заготовки* [8]. Одним из средств улучшения обрабатываемости резанием является искусственный подогрев материала срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Этот метод обработки эффективен, прежде всего, для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких материалов, а также нержавеющих и жаропрочных материалов.

• ***Электрическая энергия***.

Введение электрического тока в зону резания при лезвийной обработке [8]. Подвод электрической энергии в зону резания является эффективным средством улучшения обрабатываемости высокопрочных и твердых сталей. При обработке этих материалов на контактных поверхностях наблюдаются условия, близкие к сухому трению; при этом взаимодействие трущихся пар происходит по химически чистым поверхностям. В этом случае физическое состояние контактной пары инструмент — заготовка можно искусственно изменить путем ввода в зону резания электрического тока низкого напряжения. Электрический ток, распределяясь в зоне контакта инструмента и заготовки пропорционально контактным электрическим напряжениям, выделяет дополнительное количество тепла. Вследствие образования тонкой пластичной пленки создается полусухое трение, снижается коэффициент трения, повышается площадь истинного контакта трущейся пары. Пропускание электрического тока приводит к интенсификации процессов образования окисных пленок на поверхностях трения; кроме того, как разрыв электрической цепи, так и введение электрического тока оптимального направления и величины снижает интенсивность отрицательного воздействия тока, обусловленного процессом резания.

Формообразование рабочей поверхности абразивных инструментов на токопроводящих связках в процессе работы [3].

Возможны три схемы регулирования интенсивности принудительного удаления токопроводной связки круга в процессе шлифования. ***Совмещенная схема***. Этой схеме соответствуют метод электроабразивного шлифования. Его суть заключается в том, что между токопроводящим кругом и токопроводящей обрабатываемой заготовкой пропускается регулируемый электрический ток. Тогда к основному процессу абразивного резания добавляется электрическая энергия, направленная на повышение эффективности процесса. В зависимости от материала зерен (абразив, алмаз, кубонит), вида электрического тока (постоянный, переменный или импульсный), полярности (прямая – круг – катод, обратная – анод) и подаваемой в зону резания жидкости (электролит, диэлектрик) сформировались названия вариантов электроабразивного шлифования. Например: электролическое, электрохимическое, электроалмазное, алмазно-искровое и др. Все эти способы в той или иной мере позволяют регулировать воздействие на связку круга. Ограничением их технологических возможностей является обработка только токопроводных заготовок. ***Автономная схема***. Этой схеме соответствует воздействие на связку круга вне зоны резания, что позволяет ее использовать при шлифовании нетокопроводных сверхтвердых поликристаллов

и др. диэлектриков. В качестве метода формообразования связки целесообразно использовать электрохимический. Он позволяет выполнять формообразование на станке в процессе шлифования при отсутствии износа электрода инструмента. ***Комбинированная схема*** объединяет совмещенную и автономную схемы.

• ***Магнитная энергия***. *Магнитно-абразивная обработка*. Обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками является примером интегрированного метода обработки, в котором сочетается механическое воздействие с использованием энергии магнитного поля. По своему воздействию на обрабатываемую поверхность метод магнитно-абразивной обработки можно отнести к финишным — полирование с элементами упрочнения поверхностного слоя.

• ***Электростатическая энергия***. *Ионно-плазменные процессы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент* [2]. Изменением величины электростатического поля управляют энергией ионов, что позволяет осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыленность и имплантацию, делать очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия.

• ***Химическая энергия***. *Применение СОТС с химически активными компонентами*. Технологическая эффективность СОТС определяется комплексом его функциональных действий (эффектов) непосредственно в процессе механической обработки — смазочного, диспергирующего, охлаждающего, моющего. Смазочное действие СОТС заключается в его экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных структур. Диспергирующее действие СОТС проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и определяется его высокой поверхностной активностью — способностью непосредственно в зоне разрушения эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Моющее действие СОТС проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОТС). С помощью охлаждающего действия СОТС, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод тепла из зоны обработки и, как следствие, — снижение контактных температур и

особенно температур режущего инструмента и заготовки [9].

• ***Лучевая (лазерная — энергия лазерного луча; светолучевая — энергия светового луча видимого света)***.

Резание лезвийным инструментом с локальным нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера.

Формообразование рабочей поверхности абразивного инструмента (правка) лучом лазера.

• ***Ядерная энергия***. Ядерное воздействие на современном уровне исследований практически не изучено, хотя имеются сведения о положительном влиянии облучения на интенсивность резания труднообрабатываемых материалов, повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках [10]. Есть основания считать, что под действием излучения происходят физические процессы на уровне атомов и молекул вещества, изменяющие внутреннюю энергию и напряжения, что может быть использовано для технологических целей в интегрированных процессах обработки. Ожидаемой областью их применения могут быть финишные операции ультрапрецизионной точности на базе интегрированных процессов нанорезания. Однако в настоящее время примеры применения ядерной энергии при размерной обработке материалов отсутствуют. Кроме этого, при облучении необходимо учитывать возможное воздействие этого явления на окружающую среду, и требуются особые меры защиты персонала и создание дорогостоящих изолированных участков, требующих существенных затрат.

3.2.2. Энергия, определяющая образование формы

Группа 2 характеризует энергию, определяющую съем материала и физический механизм формообразования:

2.1 – механическая (базовый вид энергии при механической обработке);

2.2 – тепловая (энергия, выделяющаяся при деформации обрабатываемого материала и работе сил трения);

2.3 – химическая (химические процессы между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом и/или средой обработки);

2.4 – энергия фазовых переходов;

2.5 – ядерная энергия.

Примеры известных проявлений различных видов энергии [5] применительно к процессам образования формы при интегрированном формообразовании (вид энергии — форма движения материи — вид проявления).

• ***Механическая энергия при формообразовании***:

– движение твердых тел (перемещение, вращение, колебание);

– направленное движение тел и частиц (движение режуще-деформирующего инструмента, абразивных частиц; движение жидкости, газа, молекул, атомов, элементарных частиц);

– турбулентное движение частиц (движение в жидкостях, газах, плазме);

– волновые возмущения (акустические и поверхностные волны);

– упругая деформация тел (изгиб, растяжение, кручение твердых тел; сжатие твердых тел, жидкостей, газов, плазмы);

– пластическая деформация;

– хрупкое разрушение;

– межмолекулярное и межатомное взаимодействие (межмолекулярные и межатомные силы поверхностного натяжения и капиллярности на границе раздела сред, молекулярные силы сорбции).

Сорбция (от лат. sorbeo — поглощаю), поглощение твердым телом или жидкостью вещества из окружающей среды. Поглощающее тело называется сорбентом, поглощаемое им вещество — сорбатом (или сорбтивом). Различают поглощение вещества всей массой жидкого сорбента (абсорбция); поверхностным слоем твердого или жидкого сорбента (адсорбция). Поглощение вещества из газовой среды всей массой твердого тела или расплава называется также окклюзией. Сорбция, сопровождающаяся химическим взаимодействием сорбента с поглощаемым веществом, называется хемосорбцией [11].

• ***Тепловая энергия при формообразовании***:

– хаотическое тепловое движение молекул и атомов (перемещение, вращение, колебание);

– тепловое движение частиц при смещении тел (смещение твердых тел, жидкостей, газов; твердых тел и жидкостей, жидкостей и газов, твердых тел и газов; смещение твердых тел, жидкостей и газов)

– тепловое движение электронов (возбуждение электронных орбит в твердых телах, жидкостях и газах);

– тепловое движение зарядов (смещение зарядов плазмы, электронно-позитронного газа, мезонного и электронно-мезонного газа).

• ***Химическая энергия при формообразовании***:

– химические реакции соединения (окисление, рекомбинация, нейтрализация, полимеризация, гидратация, образование гиперфрагментов, ионизация с присоединением электрона или иона);

– химические реакции разложения (разложение молекул и полимеров, диссоциация, ионизация в процессе разложения, дегидратация);

– химические реакции замещения (замещение в электролитах, кристаллах

и на границе раздела сред);

– химические реакции перехода веществ из возбужденного состояния в основное (переход твердых тел, жидкостей и газов).

• ***Энергия фазовых переходов***:

– фазовые переходы первого рода (изменение агрегатного состояния и кристаллической структуры, растворение и выпаривание кристаллов);

– фазовые переходы второго рода (переход в сверхпроводящее состояние и обратно, переход ферромагнетиков в парамагнетики и обратно, переход гелия-I в гелий-II и обратно, поляризация и деполяризация диэлектриков);

• ***Ядерная энергия***:

– синтез ядер (спонтанный, управляемый, импульсный, комбинированный);

– деление ядер (спонтанное, управляемое, импульсное, комбинированное);

– радиоактивные превращения (при захвате ядром электрона с K-оболочкой, при изомерных переходах, при испускании γ-квантов, радиоактивный распад);

– аннигиляция (лептонов, бозонов, гиперфрагментов, атомов, молекул, макросистем).

3.2.3. Распределение энергии во времени

Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту:

3.1 – непрерывный, в течение всего процесса (нагрев-охлаждение);

3.2 – пульсирующий, регулярно изменяющий свою величину при неизменности направления действия;

3.3 – импульсный (воздействие, признак или параметр которого представляет собой импульс или последовательность импульсов, т. е. имеют место временные интервалы отсутствия подачи энергии).

Применительно к обработке резанием: пульсирующий подвод механической энергии соответствует случаям периодического изменения глубины резания (неравномерность припуска) и др.; импульсный — при обработке прерывистых поверхностей или со специальным импульсным нагружением инструмента, например, ударное сверление хрупких материалов.

Применительно к интегрированным методам обработки с подачей дополнительной электрической энергии признаки данной группы соответствуют характеристикам электрического тока, подаваемого в зону формообразования; использующим луч лазера — характеристикам лазерного излучения.

3.2.4. Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом

Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии:

4.1 – точечный (воздействие отдельных абразивных частиц);

4.2 – линейный (криволинейный — воздействие режущего лезвия инструмента; обработка сканированием поверхности лазером непрерывного действия);

4.3 – поверхностный (опережающий нагрев обрабатываемого материала, деформационное выглаживание поверхности детали; электрохимическое формообразование рабочей поверхности шлифовальных кругов в процессе работы);

4.4 – объемный (термическая обработка);

4.5 – точечно-линейный (воздействие отдельных закрепленных абразивных частиц, где линия — траектория их движения; сканирование поверхности импульсным лазером);

4.6 – точечно-поверхностный (интегрированное воздействие отдельных абразивных частиц на обрабатываемую поверхность и др.);

4.7 – точечно-объемный (интегрированное тепловое воздействие отдельных абразивных частиц на поверхностный слой обрабатываемой детали).

Признаки этой группы учитывают интеграцию в одном процессе нескольких видов подвода энергии. Так, например, обработка свободными абразивными частицами, электроэрозионные и ультразвуковые методы, характеризуются точечным (в физическом смысле) подводом энергии, но вследствие того, что частоты точечных воздействий велики, интегральная картина явления определяется уже результатом статистики массового воздействия на обрабатываемую поверхность. Этим методам обработки соответствует точечно-поверхностный подвод энергии.

3.2.5. Энергоемкость процесса формообразования

Группа 5 характеризует удельную энергоемкость процесса, соответствующую трем энергетическим уровням, связанным с фазовыми переходами первого рода (изменение агрегатного состояния):

5.1 – низкая (до энергии плавления);

5.2 – средняя (энергия плавления — энергия испарения);

5.3 – высокая (выше энергии испарения).

Первый энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при первом энергетическом уровне (верхней

границей является энергия плавления материала объекта обработки) для преодоления сил связи требуются сравнительно малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием (строгание, точение, сверление, фрезерование, протягивание, микрорезание, шлифование, суперфиниширование, доводка) [6]. Второй энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Типичными представителями второй группы будут методы электрофизической обработки (электроконтактная, электроимпульсная, электроэрозионная, электроискровая). Третий энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относятся электрохимический и лучевой (лазерный или светолучевой) методы обработки.

3.3. Комплекс технологических признаков

В первую очередь обращено внимание на технологический особенности процессов. В технологический комплекс признаков включено 2 группы:

– вид среды обработки;

– давление среды обработки.

3.3.1. Вид среды обработки

Под средой обработки (рабочей средой) будем понимать вещество, заполняющее пространство, непосредственно примыкающее к обрабатываемой детали и инструменту. Для контактных методов обработки (резание и пластическое деформирование) среду обработки принято называть смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС) или смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). В ряде случаев для интегрированных процессов обработки среда обработки может выполнять функции инструмента. Например, гидроструйное и гидроабразивное резание и др.

Для бесконтактных методов обработки, работающих с гарантированным зазором между инструментом и деталью — рабочей средой. К бесконтактным методам обработки относятся отдельные методы физико-химической обработки (например, электрохимическая и электроэрозионная).

Среда обработки может быть газообразной, жидкой и твердой (по агрегатному состоянию вещества) или представлять собой дисперсную систему. Дисперсные системы, состоят из множества частиц какого-либо тела (дисперсная фаза), распределенных в однородной среде (дисперсионной среде). Характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между фазами. Примеры: эмульсия (частицы масла в жидкости); суспензия (твердые частицы в жидкости); туман (частицы жидкости в газе); дым, пыль (твердые частицы в

газе).

Группа 6 характеризует среду обработки и может быть следующих видов:

6.1 – воздух;

6.2 – инертные газы;

6.3 – химически активные газы;

6.4 – вакуум;

6.5 – вода техническая;

6.6 – электролиты;

6.7 – диэлектрические жидкости (масла, керосин);

6.8 – расплавы легкоплавких металлов;

6.9 – эмульсии;

6.10 – суспензии;

6.11 – пылевидные частицы;

6.12 – твердые смазки (дисульфид молибдена и др.).

3.3.2. Давление среды обработки

Группа 7 определяет относительный уровень давления среды обработки:

7.1 – пониженное (нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент);

7.2 – нормальное (атмосферное);

7.3 – повышенное (подача СОЖ при обработке резанием);

7.4 – высокое (прокачка электролита в межэлектродном зазоре при размерной электрохимической обработке);

7.5 – особо высокое (гидроструйное и гидроабразивное резание).

3.4. Комплекс инструментальных признаков

Комплекс инструментальных признаков в первую очередь ориентирован на базовые процессы механической обработки с учетом возможности их интегрирования с электро-физико-химическими воздействиями.

Понятие «инструмент» в интегрированных технологиях не всегда идентичен такому же понятию в традиционных технологиях, например, роль «инструмента» может выполнять луч лазера, струя жидкости и др.

В комплекс инструментальных признаков включено 7 групп:

– конструктивные элементы инструмента;

– конструктивные признаки инструмента;

– соотношение процессов резания и пластического деформирования;

– виды рабочих движений инструмента;

– характер рабочих движений инструмента;

– скорость рабочих движений инструмента;

– жесткость рабочей части инструмента.

Уровень и производительность процессов механической обработки в большой мере определяются используемым инструментом.

Инструмент — орудие человеческого труда или исполнительный механизм машины. По принципу использования различают следующие виды инструмента: 1 – ручной, 2 – станочный (машинный), 3 – механизированный (ручные машины), 4 – измерительный (контрольно-измерительный), 5 – вспомогательный. Далее будем рассматривать только станочный (машинный) инструмент.

Инструмент станочный (машинный) — исполнительный элемент станка (машины) непосредственно взаимодействующий с обрабатываемым объектом (заготовкой, деталью).

Инструмент станочный (машинный) является съемным (сменным) элементом (т. е. заменяемым элементом) для его замены в случае износа или необходимости изменения его разновидности в связи с особенностями задач обработки. Износ инструмента может быть нормальным (достижение заданного критерия износа) или катастрофическим (поломка или разрушение инструмента).

3.4.1. Конструктивные элементы инструмента

Группа 8 характеризует тип конструктивных элементов:

8.1 – режущие или деформирующие элементы;

8.2 – присоединительные элементы (с базовыми поверхностями);

8.3 –вспомогательные элементы;

8.4 –объединяющий элемент.

Рассмотрим более подробно элементы инструмента [12] с учетом того, что при соответствующем конструктивном выполнении режущее лезвие функционально трансформируется в деформирующий элемент. В общем случае режущие или деформирующие элементы можно рассматривать как рабочие элементы, т. е. непосредственно участвующие в процессе обработки.

Режущие элементы (элементарные резцы) содержат режущие лезвия и предназначены для осуществления процесса резания. Это зубья, пластины из инструментальных материалов (в том числе сменные многогранные), ножи, вставки, элементарные резцы и т. п. Заметим, что в отличие от других элементарных резцов зубья конструктивно не оформлены и не имеют собственных присоединительных элементов. Зубья характерны для цельных инструментов, в то время как конструктивно оформленные элементарные резцы характерны для сборных инструментов с разъемным соединением,

Присоединительные элементы с установочными базовыми

поверхностями предназначены для установки, базирования, присоединения и крепления режущего инструмента к станку или приспособлению, а также для передачи сил, моментов и движений. Это державки, оправки, «ласточкины хвосты», цилиндрические и конические хвостовики, базовые отверстия и торцы, шпоночные пазы и т. п.

Вспомогательные элементы служат для размещения, отвода, разделения стружки; размещения и крепления режущих элементов; направления инструмента во время, работы; его наладки и регулировки; подвода СОТС и др. Вспомогательные элементы могут быть отдельными деталями или частью цельной конструкции. К ним относятся: стружечные канавки и уступы; накладные стружколомы; стружкоразделительные канавки; пазы; прихваты; штифты; винты; клинья; компенсаторы; направляющие и т. п.

Объединяющий элемент предназначен для размещения режущих и других элементов с объединением их в единое целое. Как правило, у сборных инструментов объединяющим элементом является корпус, а у цельных — та или иная условно выделяемая промежуточная часть между элементами.

В состав перечисленных конструктивных элементов входят ограничивающие их поверхности и линии (геометрические элементы), например, передняя и задняя поверхности, режущая кромка, базовые поверхности.

Кроме того, принято выделять также составные части инструмента, каждая из которых является совокупностью тех или иных элементов.

Режущая часть содержит элементарная резцы, не участвующие в процессе формообразования. Она служит только для срезания припуска, ее кромки не соприкасаются с заданной чертежом поверхностью детали. Режущую часть иногда называют заборной (от понятия «забирать» обрабатываемый материал).

Калибрующая часть содержит элементарные резцы, участвующие в процессе формообразования и формирующие поверхность обрабатываемой детали с заданными размерами и свойствами.

Совокупность режущей и калибрующей частей называют *рабочей частью* режущего инструмента. Наличие всех указанных элементов и составных частей не всегда обязательно. Например, иногда отсутствуют вспомогательные элементы, калибрующая часть совпадает с режущей частью и т. п.

3.4.2. Конструктивные признаки инструмента

Группа 9 характеризует конструктивные признаки инструмента по целостности и виду соединения частей и элементов:

9.1 – цельный или монолитный (инструмент, изготовленный из одной

заготовки);

9.2 – составной (инструмент с неразъемным соединением его частей и элементов);

9.3 – сборный (инструмент с разъемным соединением его частей и элементов, которые в свою очередь могут быть как цельными, так и составными).

Составной режущий инструмент или элемент может быть сварным, клееным, паяным и др. (т. е. может использоваться любое, конструктивно и технологически оправданное, неразъемное соединение).

Особым случаем формирования рабочей части инструмента является нанесение износостойких покрытий или наваривание инструментального материала (неразъемное соединение).

3.4.3. Соотношение процессов резания и пластического деформирования

Группа 10 характеризует тип инструмента по соотношению процессов резания и / или пластического деформирования:

10.1 – режущий инструмент;

10.2 – режуще-деформирующий инструмент;

10.3 – деформирующе-режущий инструмент;

10.4 – деформирующий инструмент.

• ***Режущий инструмент***. Для этого типа инструментов преобладающим является процесс резания — снятие стружки при несущественных остаточных деформациях поверхностного слоя детали. Режущий инструмент принято разделять на лезвийный (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, прошивки и др.) и абразивный (шлифовальные круги, сегменты, бруски и др.). В результате механической обработки резанием поверхностные слои пластически деформируются при их превращении в стружку, что сопровождается их упрочнением (наклепом) и формированием в них остаточных напряжений.

• ***Режуще-деформирующий инструмент***. Такой тип инструмента совмещает в себе режущие и деформирующие элементы. Например, режуще-деформирующая протяжка, метчик-раскатник и др.

• ***Деформирующе-режущий инструмент***. Для инструментов этого типа преобладающим является процесс пластической деформации сопутствующий фрикционным явлениям. Например, пилы и ленты для фрикционной резки материалов, иглофрезы.

Фрикционная резка является примером положительного использования тепловых явлений [8]. Процесс фрикционного резания быстро вращающимся

диском осуществляется путем разупрочнения обрабатываемого материала, под действием выделяющегося при трении тепла. Относительно низкая теплопроводность жаропрочных, нержавеющих сталей и титановых сплавов способствует применению этого метода, так как повышает локализацию температуры в зоне резания, увеличивая степень размягчения и разупрочнения; вращение диска создает его надежное охлаждение.

Иглофреза представляет собой специальную конструкцию плотной проволочной щетки [13]. Иглофрезы используют не только для очистки, но и при определенных условиях, для съема значительных слоев металла (до 4 мм за один проход). Отличительной особенностью иглофрез является большая плотность ворсовой части. Собранная под большим давлением ворсовая часть иглофрезы обладает большой жесткостью. При работе иглофрез ворсинки в силу значительной плотности и взаимного расположения отклоняются лишь на небольшой угол, представляя собой своеобразный полужесткие деформирующе-режущие элементы.

• ***Деформирующий инструмент.*** Такой тип инструмента имеет только деформирующие элементы и в процессе его работы стружка не образуется. Примеры деформирующих инструментов: выглаживатели (сферические —трение скольжение, шариковые или роликовые — трение качения); накатники для накатки рифлений (прямых или сетчатых); ролики резьбовые для формирования наружной резьбы; раскатники для формирования внутренней резьбы; сверла для фрикционного бесстружечного сверления.

Группы 11÷13 расширяют понятие рабочих движений инструмента.

3.4.4. Виды рабочих движений инструмента

Группа 11 характеризует виды движений в системе координат изделия:

11.1÷11.3 – прямолинейное по осям *X*, *Y*, *Z*;

11.4÷11.6 – вращательное вокруг осей *X*, *Y*, *Z*.

Общая классификация схем резания применительно к механической обработке поверхностей впервые была разработана Г.И. Грановским [14]. Кинематические схемы учитывают возможные комбинации двух движений: вращательного и поступательного. На этой основе классифицированы все возможные, в том числе и не нашедшие практического применения, принципиальные кинематические схемы резания (по группам): I – одно прямолинейное движение; II – два прямолинейных; III – одно вращательное; IV – одно вращательное и одно прямолинейное; V – два вращательных; VI – два прямолинейных и одно вращательное; VII – два вращательных и одно прямолинейное движение; VIII – три вращательных движения.

3.4.5. Характер рабочих движений инструмента

Группа 12 характеризует характер отдельных рабочих движений и их комбинаций по виду траектории результирующего движения и характеру изменения скорости:

12.1 – прямолинейное параллельное одной из координатных осей;

12.2 – прямолинейное параллельное одной из координатных плоскостей;

12.3 – прямолинейное пространственное (траектория — прямая линия);

12.4 – криволинейное плоское (траектория лежит в одной плоскости);

12.5 – криволинейное пространственное;

12.6 – поступательное;

12.7 – возвратно-поступательное;

12.8 – циклическое;

12.9 – осциллирующее;

12.10 – вероятностное;

12.11 – фрактальное;

12.12 – отсутствует.

Вероятностный тип движений имеет место при обработке свободным абразивными частицами. Фрактальное движение — может использоваться для уменьшения температурных деформаций при генеративных (аддитивных) методах формообразования.

3.4.6. Скорость рабочих движений инструмента

Группа 13 характеризует скорости рабочих движений:

13.1 – низкая;

13.1 – средняя;

13.3 – высокая.

Уровень скоростей рабочих движений инструмента целесообразно согласовать со скоростями при традиционной обработке резанием: низкая –менее 10^{-5} м/с соответствует уровню линейных скоростей износа инструмента; средняя – $10^{-5} \div 1$ м/с — применяемым скоростям подач; высокая – более 1 м/с — скоростям резания. Значения интервалов в достаточной мере условны с учетом существенной разницы скоростей рабочих движений при лезвийной и абразивно-алмазной обработке.

3.4.7. Жесткость рабочей части инструмента

Группа 14 характеризует условную жесткость рабочих элементов инструмента:

14.1 – жесткий (режущий и деформирующий инструмент);

14.2 – полужесткий (иглофрезы);

14.3 – маложесткий (инструмент для полирования и финишной обработки);

14.4 – условно нежесткий (струйная или струйно-абразивная обработка, магнитно-абразивной обработка, виброабразивная обработка)

3.5. Комплекс признаков формообразования

Комплекс формообразующих признаков был рассмотрен как замыкающий и включает в себя 4 группы:

– метод размерного формообразования;

– главный физический процесс, определяющий размерное формообразование;

– характер формообразования;

– состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.

3.5.1. Классификация формообразующих поверхностей деталей

Современные сложные машиностроительные изделия характеризуются многообразием форм обрабатываемых поверхностей. Это приводит к сложности принятия технологических решений при выборе рационального интегрированного процесса обработки. Необходимо использовать научно-обоснованную классификация поверхностей изделий, включающую определенную систему геометрических признаков.

Геометрическая классификация поверхностей необходима для систематизации известных способов формообразования поверхностей при механической обработке изделий. Такая классификация должна учитывать требования технологии изготовления изделий. Она необходима для упрощения исследования сложных поверхностей и изучения их геометрической структуры. На базе такой классификации можно создать системы технологической подготовки ресурсосберегающего производства сложных машиностроительных изделий.

В настоящее время невозможно разработать универсальную классификацию поверхностей. Внутри каждого способа образования поверхностей существует свои классификационные признаки, например, в кинематическом способе образования поверхностей целесообразно в основу систематизации положить вид образующих и закон их перемещений.

Существуют классификации поверхностей, группирующих их по определенным признакам в однотипные семейства для нормализации и типизации технологических процессов изготовления. Вопросы систематизации

и классификации поверхностей рассматривались рядом авторов, в частности Н.Н. Голованов[15] и И.А. Дружинским [16, 17]. На базе их работ можно выделить следующие группы классификационных признаков:

– по степени сложности поверхностей;

– по форме образующей и направляющих;

– по способу построения поверхностей.

Обобщенная схема классификации, представлена на рис. 1. Классификация основных типов поверхностей машиностроительного назначения основана на следующих работах [15, 16, 17].

Следует отметить, что вторая группа [16, 17], использующая форму образующей и направляющей, позволяет классифицировать поверхности машиностроительных изделий. Третья группа [15] – по способу построения, позволяет классифицировать поверхности по их математическому описанию.

Во второй и третьей группах (рис. 1) отражены лишь наиболее распространенные группы поверхностей. Изначально поверхности могут быть построены либо по локальной системе координат и скалярным параметрам, либо по характерным точкам или линиям. Далее эти поверхности могут быть продлены или усечены. Рассмотренные поверхности имеют прямоугольную или треугольную области определения параметров. На их базе можно построить ограниченные контурами поверхности произвольной формы.

Поверхности с произвольной границей представляют собой наиболее общий тип — ограниченные контурами поверхности. Их можно построить на основе любой поверхности с прямоугольной или треугольной областью определения путем изменения ее параметров. Такие поверхности лежат в основе моделирования тел. Параметры могут принимать значения только внутри области, ограниченной заданными на ней контурами.

Применение в изделиях поверхностей сложной формы обычно вызвано необходимостью реализации определенных функциональных свойств [16], например:

– обеспечение высоких коэффициентов полезного действия (КПД) энергетических установок, в которых работает деталь или изделие (лопасти водяных турбин, гребные винты кораблей, лопатки паровых турбин, крыльчатки газовых турбин и др.);

– придание определенной формы исходя из условий расчета напряжений (форма лопастей рабочих колес водяных турбин, сечения полотен рабочих колес паровых турбин и др.).

Форма поверхности, которая выбирается конструктором, всегда подчинена определенной цели, зависящей от назначения детали или изделия, среды, в которой они работают, материала, размеров и т. д. — т. е. является

функциональным назначением.

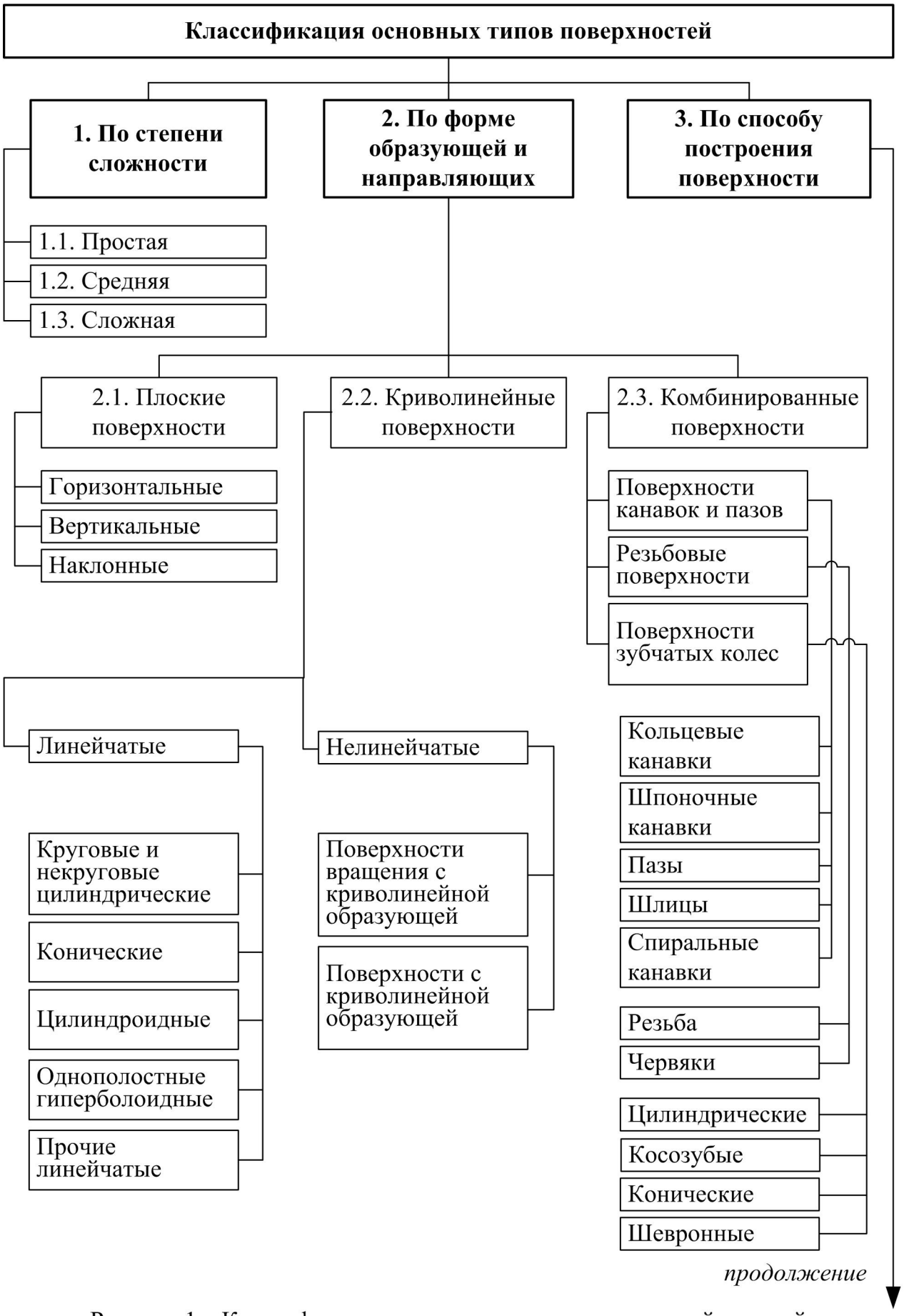

Рисунок 1 – Классификация основных типов поверхностей изделий машиностроительного назначения

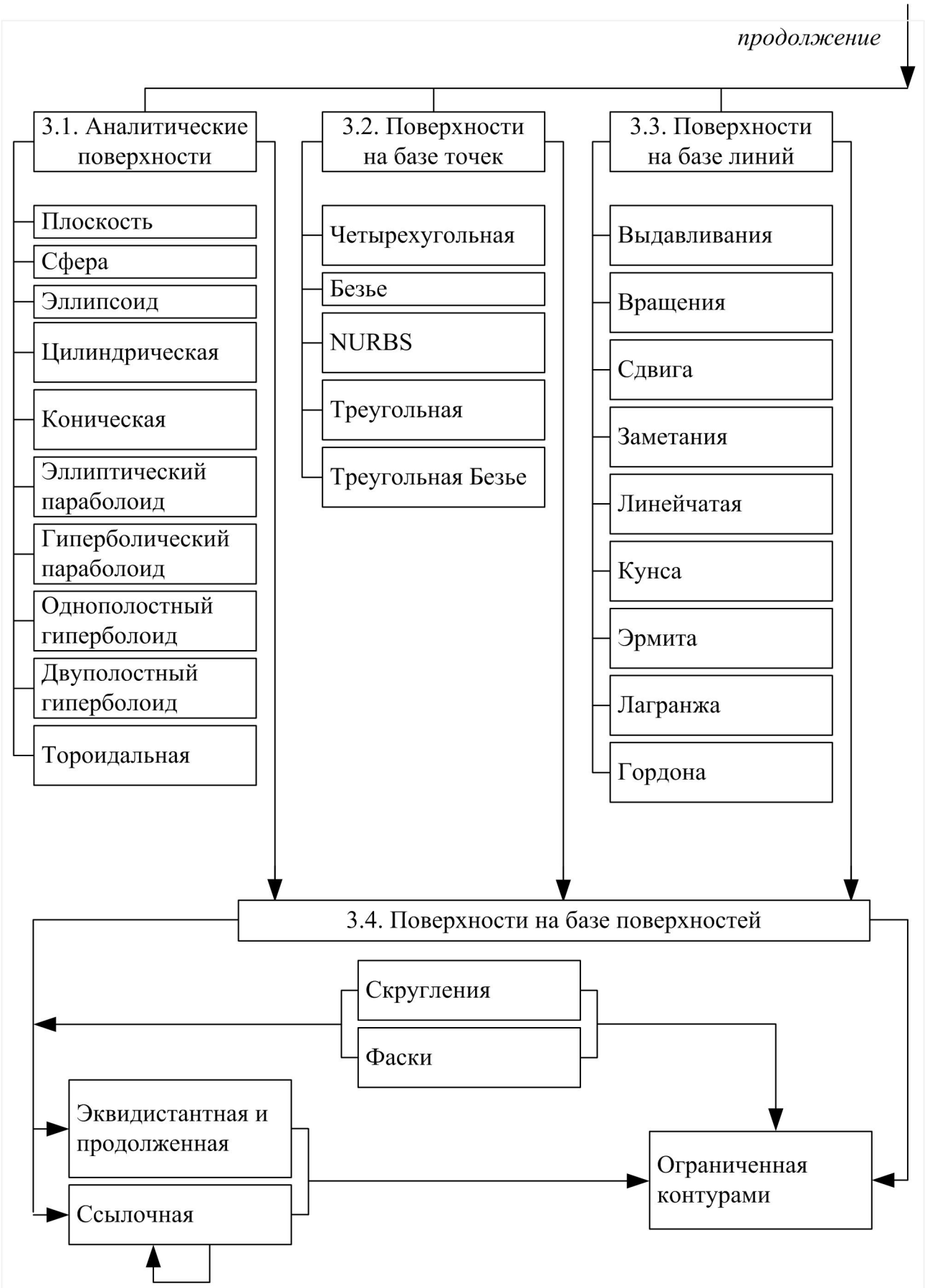

Рисунок 1 – Классификация основных типов поверхностей изделий машиностроительного назначения (продолжение)

При описании поверхности детали дополнительно указываются ее геометрические и механические характеристики качества. На чертеже эти показатели задаются в виде допустимых предельных отклонений (размеров, относительного положения и отклонений от правильной геометрической формы), допустимыми значениями шероховатости обработанной поверхности R_a / R_z и твердостью.

3.5.2. Элементы теории формообразования

Вопросы формообразования поверхностей резанием достаточно подробно рассмотрены П.Р. Родиным [18] и Б.А. Перепелицей [12].

Механическая обработка состоит из двух взаимосвязанных процессов: процесса срезания припуска и процесса формообразования.

Формообразование — это образование требуемой формы детали, определяемой геометрическим характером и взаимным расположением ограничивающих ее поверхностей, а также параметрами макро- и микрогеометрии.

Если рассматривать задачу чисто геометрически, без учета сил, тепловых явлений, износа инструмента и технологических особенностей процесса, то формообразование — это получение заданных чертежом поверхностей детали.

Формообразование осуществляют формообразующие элементы (точки, линии или поверхности), принадлежащие инструменту и контактирующие с поверхностью детали при обработке. При обработке резанием формообразующими являются точки или линии на режущих кромках, а при обработке давлением формообразующими являются рабочие поверхности инструментов. Формообразующая поверхность используется и при резании, но лишь условно, в качестве промежуточной инструментальной поверхности Непосредственный контакт с поверхностью детали осуществляют контактные элементы, расположенные на формообразующих элементах. Контактными элементами могут быть точки, линии или поверхности. Контактный элемент может быть фиксированным (неизменно расположенным) на формообразующем элементе, текущим (изменяющим положение) или полностью совпадающим с формообразующим элементом.

В процессе формообразования инструмент совершает относительно обработанной детали формообразующие движения и, контактируя с поверхностью детали своими формообразующими элементами, производит формообразование.

Таким образом, процесс формообразования включает в себя:

– деталь с ограничивающими ее поверхностями (поверхность детали Д);

– инструмент с формообразующими элементами (исходная инструментальная поверхность И);

– формообразующие движения ФД (кинематика формообразования).

Методы формообразования могут различаться типами формообразующего и контактного элементов (поверхность, линия, точка); формообразующим движением; характером контактирования (непрерывное или прерывистое) и другими признаками.

3.5.3. Метод размерного формообразования

Предлагаемая классификация методов размерного формообразования является достаточно условной и не заменяет классификации [12, 18], направленные в первую очередь, на проектирование сложно-профильных режущих инструментов. Методы размерного формообразования можно разбить на три подгруппы: копирования, кинематический и комбинированный [7].

Группа 15 определяет метод формирования формообразующих поверхностей детали:

15.1 – копирования (а – формы и размеров инструмента, б – только формы);

15.2 – кинематический (точечный);

15.3 – комбинированный.

• ***Размерное формообразование методом копирования***.

Метод копирования объединяет процессы формообразования, в которых форма инструмента является определяющей. В этом случае формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как линия или поверхность. В одних случаях (а) на детали копируется форма и размеры (мерный инструмент), в других — только форма инструмента (б).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров только за счет геометрии инструмента (а):

– протягивание, деформирующее протягивание, прошивание, дорнование внутренних поверхностей (ФД — прямолинейное);

– нарезание наружной резьбы плашками круглыми, накатывание — резьбонакатными роликами (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);

– накатывание наружной резьбы плашками плоскими (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);

– нарезание внутренней резьбы метчиками, раскатывание — метчиками-раскатниками (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемые конструкцией инструмента);

– сверление, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование,

доводка цилиндрических отверстий (ФД: вращательное и прямолинейное);

– доводка конических отверстий (ФД: вращательное).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет геометрии инструмента и заданного относительного расположения детали и инструмента (б):

– строгание, долбление, протягивание наружных поверхностей (ФД — прямолинейное);

– нарезание резьбы резцами и гребенками (ФД: вращательное и прямолинейное);

– фрезерование канавок цилиндрических прямозубых зубчатых колес профильными дисковыми и пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное);

• ***Кинематический метод размерного формообразования***.

Кинематический метод объединяет процессы обработки поверхностей для случая, когда форма инструмента не является определяющей. В таких случаях формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как точка, имеющая заданную траекторию движения относительно детали — форма инструмента не рассматривается, т. к. не оказывает влияния на поверхность детали. Формообразующая точка — точка контакта калибрующего элемента инструмента с поверхностью детали. Положение такой точки в инструментальной системе координат будет постоянным для случая обработки плоскостей и тел вращения с прямоугольной образующей.

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет траектории движения формообразующей точки инструмента:

– строгание плоских поверхностей (ФД — два прямолинейных);

– точение и растачивание цилиндрических поверхностей (ФД: вращательное и прямолинейное);

– точение и растачивание конических поверхностей (ФД: вращательное и два прямолинейных);

– фрезерование плоскостей торцовыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное).

• ***Комбинированный метод размерного формообразования.***

Комбинированный метод объединяет процессы формообразования, в которых форма поверхности детали образуется в результате совмещения копирования исходной инструментальной поверхности и заданных формообразующих движений. Комбинированный метод отличается от метода копирования добавлением еще одного формообразующего движения.

Одной из разновидностей комбинированного метода формообразования является метод обкатки при обработке зубчатых колес. При обработке методом

обкатки поверхности зубьев получаются в результате обработки инструментом, режущие кромки которого представляют собой профиль сопряженной рейки или профиль зуба сопряженного колеса, и во время обработки инструмент с заготовкой образует сопряженную (правильно зацепляющуюся) зубчатую пару.

Примеры процессов формообразования комбинированным методом:

– точение и растачивание фасонных поверхностей с непрямолинейной образующей (ФД: вращательное и два прямолинейных);

– фрезерование винтовых канавок дисковыми фрезами (ФД: вращательное и одно или два прямолинейных);

– фрезерование сложных поверхностей фасонными пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и три прямолинейных).

Примеры процессов формообразования комбинированным методом обкатки:

– фрезерование зубчатых колес и шлицевых валов червячными фрезами (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);

– зубодолбление — строгание зубьев инструментом в виде зубчатого колеса (долбяка), контур торца зубчатого венца которого служит режущей кромкой (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);

– шевингование зубчатых колес дисковым шевером — многолезвийным инструментом в виде зубчатых колеса с лезвиями на боковых поверхностях его зубьев, для обработки боковых поверхностей зубьев, при которой для осуществления резания используется относительное скольжение (ФД: два вращательных);

– шлифование эвольвентных зубьев тарельчатыми кругами (ФД: вращательное и прямолинейное).

3.5.4. Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование

Группа 16 характеризует основные физические процессы, определяющие размерное формообразование (размерный съем материала, размерную деформацию, размерное соединение частиц и т. п.):

16.1 – пластическая деформация;

16.2 – хрупкое разрушение (скалывание);

16.3 – плавление (отвердевание);

16.4 – испарение (конденсация);

16.5 – химическое растворение;

16.6 – электролиз растворов или расплавов;

16.7 – кристаллизация из растворов или расплавов;

16.8 – направленное взаимодействие наэлектризованных или

намагниченных частиц;

16.9 – взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов;

16.10 – ядерные преобразования вещества.

При обработке резанием лезвийным и абразивным инструментом будут иметь место пластическая деформация и хрупкое разрушение. В случае полирования или доводки может иметь место химическое воздействие активных сред. Поверхностно-упрочняющая обработка (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.) — пластическая деформация. Интегрированные методы обработки с использованием дополнительных физико-химических воздействий могут включать в себя процессы плавления, испарения и химические реакции и др. Генеративные (аддитивные) методы могут включать в себя процессы, связанные с добавлением материала при размерном формообразовании.

3.5.5. Характер формообразования

Группа 17 характеризует основной процесс формообразования:

17.1 – удаление материала заготовки;

17.2 – изменение расстояния между точками твердого тела;

17.3 – нанесение (наращивание) материала.

Удаление материала заготовки соответствует процессам обработки материалов резанием. Изменение расстояния между точками твердого тела — методам поверхностно-упрочняющей обработки (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.). Нанесение (наращивание) материала соответствует методам генеративных (аддитивных) технологий. В контексте рассматриваемых вопросов — это нанесение износостойких покрытий на инструмент и защитно-декоративные покрытия поверхности детали для защиты от коррозии и придания эстетического внешнего вида.

3.5.6. Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования

Применительно к интегрированным процессам обработки в качестве обрабатываемого объекта может выступать как обрабатываемая деталь, так и инструмент. Например, при формообразовании (правке) рабочей поверхности шлифовальных кругов объект — инструмент.

Группа 18 определяет физическое состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования (состояние «стружки») [7].

18.1 – твердое (обработка резанием лезвийным и абразивным инструментом с закрепленными режущими элементами);

18.2 – твердое диспергированное (обработка резанием хрупких материалов, обработка свободными абразивными зернами);

18.3 – в расплаве (при использовании в качестве СОТС расплавов);

18.4 – в жидком растворе (при электрохимическом растворении);

18.5 – капельно-жидкое (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов);

18.6 – парообразное (при введении лучевой энергии);

18.7 – газообразное ионизированное (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов);

18.8 – газообразное нейтральное (при введении лучевой энергии);

18.9 – исходное состояние не изменяется (обработка резанием и пластическим деформированием);

18.10 – «стружка» отсутствует (обработка пластическим деформированием).

Знание конечного состояния отходов позволяет составить энергетический баланс процесса формообразования [7]. Чем выше энергосодержание «стружки» (газ, пар, жидкое состояние, твердое диспергированное вещество и т. д. по степени снижения внутренней энергии), тем более энергоемок процесс в целом.

Энергоемкость процесса формообразования интегрированными методами обработки имеет тенденцию к снижению в следующих случаях:

– чем меньше материала заготовки переходит в «стружку» и чем ниже ее энергосодержание;

– чем меньше изменений вносится в материал изделия по сравнению с исходным материалом заготовки;

– чем меньше происходит потерь энергии в окружающую среду.

Предложенная классификация позволяет с единых позиций рассматривать и оценивать характеристики различных интегрированных процессов обработки материалов. Классификационные признаки и их группирование, не заменяют, а дополняют различные существующие системы классификации отдельных процессов, методов и способов обработки материалов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

1. На какие основные группы делятся целевые рабочие процессы изготовления изделий в машиностроении?
2. Назовите основные рабочие процессы формообразования.
3. Перечислите основные целевые рабочие процессы изготовления изделий.
4. Охарактеризуйте тенденции развития методов обработки материалов резанием.
5. Назовите основные принципы создания интегрированных процессов обработки материалов резанием.
6. Приведите примеры интегрированных процессов обработки материалов резанием.
7. Чем абразивная обработка отличается от лезвийной?
8. Чем обработка резанием отличается от обработки давлением?
9. Перечислите виды энергии, непосредственно подводимой к объекту.
10. Проведите сравнительный анализ видов энергии, определяющей образование формы.
11. Какие особенности имеет подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом?
12. Охарактеризуйте комплекс технологических признаков.
13. Оцените взаимосвязь конструктивных элементов инструмента.
14. Как соотносятся процессы резания и пластического деформирования в интегрированных технологиях?
15. Перечислите основные виды рабочих движений инструмента.
16. Как влияет жесткость рабочей части инструмента на процесс обработки?
17. Назовите основные принципы классификации формообразующих поверхностей деталей.
18. Охарактеризуйте базовые элементы теории формообразования.
19. Перечислите физические процессы, определяющие размерное формообразование.
20. Как влияет состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования на энергоемкость процесса?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоладзе Т.Н. Основные вопросы оптимизации технологии машиностроительного производства. Монография. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1987. – 252 с.

2. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А.И. Грабченко. — Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. — 416 с.

3. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Залога В.А., Новоселов Ю.К., Якубов Ф.Я. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. — 2-е изд., перераб. и дополн. — Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. — 534 с.

4. Сущность и технологические возможности комбинированных методов обработки: Конспект лекций / А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов, Т.Н.Рысева, М.А. Тамаркин. — Ростов н/Д: РИСХМ, 1990. — 74 с.

5. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др.; Под общ. ред. В.А. Лукьянца. — М.: Машиностроение, 1993. — 224 с.

6. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2005. — 272 с.

7. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. — М.: Машиностроение, 1967. — 294 с.

8. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. — М.: Высш. школа, 1974. — 587 с.

9. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. / Машиностроение. — М., 2000. — Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Суслова. — 840 с.

10. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. — М.: Машиностроение, 2005. — 511 с.

11. Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

12. Перепелица Б.А. Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учебное пособие. — Харьков: ХПИ, 1985. — 107 с.

13. Ермаков Ю.М. Состояние и тенденции развития комбинированных способов механической обработки. — М.: ВНИИТЭМР, 1985. — 48 с.

14. Грановский Г.И. Кинематика резания. — М: Машгиз, 1948. — 200 с.

15. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. — М.: Изд-во Физ.-

мат. лит., 2002. — 472 с.

16. Дружинский И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках. — М.-Л.: Машиностроение, 1965. — 600 с.

17. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1985. — 263 с.

18. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. — К.: Выща шк., 1990. — 424 с.

19. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник [для высш. учебн. заведений] / Грабченко А.И., Залога В.А., Внуков Ю.Н., Верезуб Н.В., Доброскок В.Л., Майборода В.С., Марцинковский В.С., Посвятенко Э.К., Пыжов И.Н., Саленко А.Ф., Тарасюк А.П., Тарельник В.Б., Узунян М.Д., Фадеев В.А., Федорович В.А., Якубов Ф.Я., Якубов Ч.Ф. ; под общ. ред. А.И. Грабченко и В.А. Залоги. — Сумы: Университетская книга, 2017. — 451 с.