



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология машиностроения»

ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Автор:

Лебедев В.А.

Ростов-на-Дону, 2012



Аннотация

В книге показаны назначение и роль методов ППД в технологии изготовления деталей машин. Раскрыты основы системно – структурного проектирования технологических систем обработки деталей методами ППД, методика построения рациональной структуры операций и ее обоснование в САПР ТП.

Рассмотрены закономерности формирования и упрочнения поверхностного слоя динамическими методами ППД; важное место отведено исследованию энергетических аспектов и моделированию процессов обработки динамическими методами ППД; прогнозированию эксплуатационных свойств деталей после обработки ППД. Описаны технологические возможности динамических методов ППД и средства их технологического оснащения.

Предназначена для научных и инженерно – технических работников НИИ и предприятий машиностроения, магистров и аспирантов машиностроительных специальностей.

Автор

проф., к.т.н. Лебедев В.А.





Оглавление

Предисловие	4
1 основы проектирования операций ППД.....	10
1.1 Назначение и способы реализации операций ППД.....	10
1.2 Структурная схема технологической системы ППД.....	17
1.3 Обобщенная модель проектирования операций ППД	24
1.4 Принципы разработки рациональной структуры операции ППД .	37
1.5 Обоснование элементного участка ППД	48
1.6 Типизация технологических операций ППД.....	67
1.7 Формализация проектирования операций ППД	81
2. Закономерности формирования и упрочнения поверхностного слоя динамическими методами ППД	87
2.1 Упруго-пластическая деформация – единая основа методов ППД	87
2.2 Энергетические аспекты и критерий упрочнения деталей динамическими методами ППД.....	101
2.3 оценка производительности динамических методов ППД.....	115
3 Повышение эффективности динамических методов ППД на основе моделирования динамических характеристик процесса (на примере виброударной обработки)	122
4 Прогнозирование влияния динамических методов ППД на повышение эксплуатационных свойств деталей	151
5 Характеристика динамических методов ППД и средств их технологического оснащения	166
Литература.....	193



ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежность работы машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. При эксплуатации детали машин контактируют друг с другом или с окружающей средой. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная (с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей) поверхность должна быть достаточно твердой, иметь сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большей опорной площадью поверхности.

С помощью широко применяемых методов окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма деталей с заданной точностью, но часто не обеспечивается оптимальное качество поверхностного слоя. Оно достигается поверхностным пластическим деформированием (ППД), при котором стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. В результате формируется новый микрорельеф и упрочняется поверхностный слой, повышается его износостойкость, стойкость к коррозионным воздействиям и т.д. Во многих случаях применением ППД удается повысить запасы прочности и увеличить срок службы деталей. По каждому или почти по каждому методу ППД имеются отдельные монографии, брошюры, отраслевые стандарты. Сведения по методам ППД представлены в многочисленных статьях, сборниках и других публикациях. Широко известны работы в области ППД ученых Кудрявцева И.В., Петросова В.В., Рыковского Б.П., Шнейдера Ю.Г., Смелянского В.М., Гринченко И.Г., Проскуракова Ю.Г., Саверина М.М., Бабичева А.П., Попова М.Е., Папшева Д.Д., Одицова Л.Г. и других, в которых заложены научные и технологические основы методов ППД, обобщены результаты их использования в машиностроительной практике. Вместе с тем в большинстве работ методы ППД рассматриваются, обособленно без связи с другими методами поверхностного деформирования, что не позволяет объективно подойти к разработке операций ППД при проектировании технологических процессов изготовления дета-



Технология машиностроения

лей машин с единых теоретических и методических позиций. В этой связи разработка методических основ проектирования операций ППД имеет, прежде всего, важное практическое значение.

С целью решения этой задачи в монографии изложены основные положения системно-структурного подхода к проектированию технологических систем обработки деталей методами ППД. Кроме того, накопленный к настоящему времени опыт проектирования технологических процессов изготовления деталей машин свидетельствует, что наиболее эффективно вопросы проектирования решаются на основе моделирования операций и их технологических систем. Это позволяет в каждом конкретном случае научно-обоснованно подойти к выбору метода ППД и обосновать в комплексе оптимальные как технологические режимы обработки, так и конструктивные параметры оборудования применяемого для реализации операций ППД.

Под поверхностным пластическим деформированием в общем виде принят процесс формирования поверхностного слоя деталей, основанный на пластической деформации поверхности.

Понятие "процесс ППД" – обобщенное, это метод обработки деталей путем пластической деформации поверхностного слоя в результате механического воздействия инструмента или обрабатывающей среды. Такое понятие позволяет систематизировать и формализовать разрозненные сведения о различных методах ППД.

Поскольку единым элементом любого метода ППД является организованное упруго-пластическое деформирование обрабатываемого материала, методической основой его рационального осуществления является такая схема деформирования, при которой процесс протекает с наименьшими энергозатратами при обеспечении заданных технических ограничений по качеству изготавливаемой детали. Поэтому разработка обобщенных физических, структурных, математических моделей процесса ППД, задача весьма актуальная, решение которой позволяет с единых методических позиций изложить особенности методов ППД и определить рациональные области их применения.

Общеметодический подход к проектированию операций обработки деталей методами ППД при изготовлении деталей машин должен учитывать задачи, стоящие перед технологом, и конкретные производственные условия, когда необходимо, исходя из заданных технико-экономических ограничений как по параметрам изготавливаемой детали (качество поверхности, эксплуатационные свойства и др.), так и по условиям эксплуатации оборудова-



Технология машиностроения

ния, инструмента или обрабатывающей среды, выбрать из всего многообразия (рис.1) оптимальный метод ППД и назначить для него режимы обработки.

Практика показывает, что в современном производстве не существует универсальных методов ППД в равной мере эффективных для обработки деталей различных типов и видов. Каждый метод ППД имеет свою конкретную область рационального применения.

В процессе ППД происходит упрочнение (наклеп) поверхностного слоя, что предопределяет главное технологическое назначение методов ППД и их место в технологии изготовления деталей машин

Укрупнено структура маршрутного технологического процесса изготовления деталей содержит шесть основных переделов (рис.2), выполнение которых при изготовлении деталей объемом V_d дает либо уменьшение объема заготовки V_z , либо сохраняет его неизменным, либо приводит к его увеличению. Переделы обработки ППД позволяют, не изменяя объема, обеспечить требуемые эксплуатационные свойства деталей.

Современное машиностроение добивается повышения производительности путем сокращения производственного цикла, т.е. освоения малооперационных технологических процессов изготовления деталей машин, и в первую очередь за счет рационального выбора соответствующего метода получения заготовки.

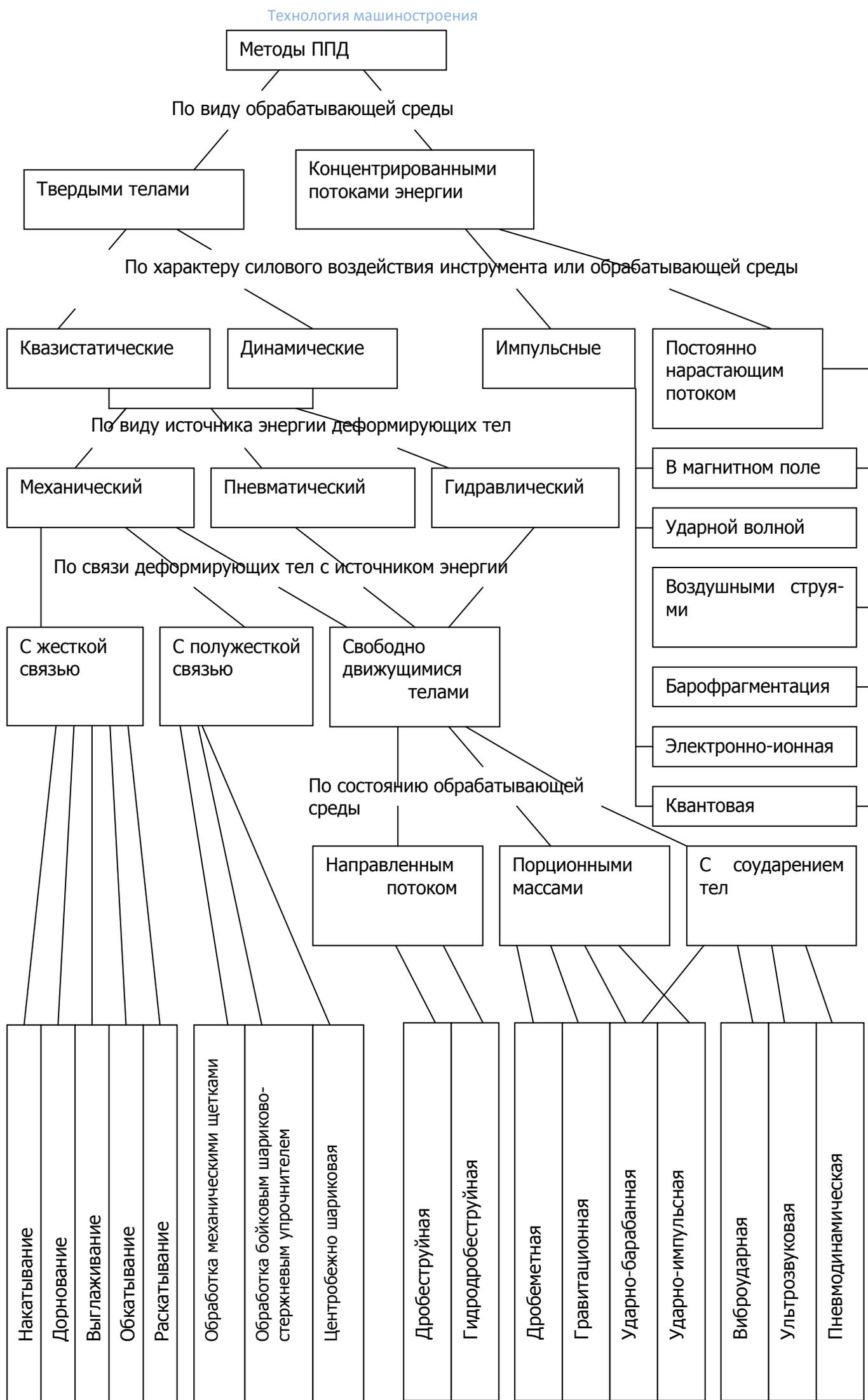


Рис.1. Классификация методов ППД



Однако, несмотря на создание таких современных методов получения заготовок, как точные виды литья, прокат, штамповка и др., заготовительные процессы в большинстве своем не обеспечивают заданных конструктором требований к точности, качеству поверхности и эксплуатационным характеристикам.

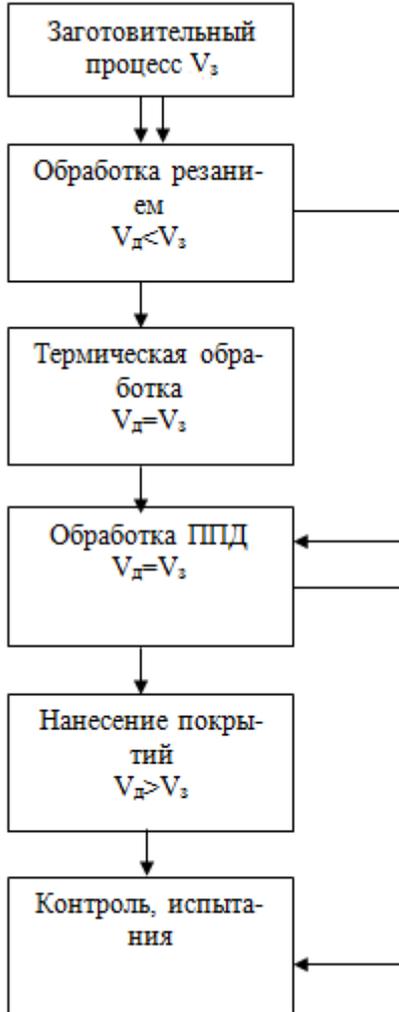


Рис.2. Структура маршрутного технологического процесса Изготовления детали



В этой связи технологи вынуждены применять дополнительные методы обработки для получения необходимого качества поверхности и требуемых эксплуатационных свойств деталей, в том числе и методы ППД. Именно эти методы позволяют обеспечить благоприятные с точки зрения эксплуатации деталей физико–механические характеристики поверхностного слоя и, являясь завершающими в процессе изготовления, определяют во многом надежность деталей. Таково техническое обоснование необходимости широкого промышленного использования методов ППД (на рис.2 показаны возможные варианты создания малооперационных технологических процессов за счет применения обработки ППД).

Экономическая оценка целесообразности включения операций ППД в процесс изготовления детали, как правило, рассматривается в рамках влияния её на трудоемкость выполнения всего технологического цикла производства детали, при этом экономически не оценивается эксплуатация детали в машине. Таким образом, операции ППД неоправданно не включаются в цикл изготовления детали из-за некоторого его удорожания. В результате, как показывает практика, ресурс работы отдельных деталей не соответствует ресурсу работы машины, что ведет к дополнительным затратам, связанным с её эксплуатацией или ремонтом.

Так что дальнейшее развитие методов ППД, расширение области их применения в технологических процессах изготовления деталей машин вполне закономерно и обусловлено тенденцией непрерывного повышения эксплуатационных характеристик проектируемых изделий.

Применительно к методам ППД к настоящему времени получены многочисленные закономерности для оценки их экономичности и производительности, прогнозирования влияния их на показатели качества и эксплуатационные свойства деталей. Вместе с тем оптимизация процессов ППД, как правило, производится только по одному параметру. Это не позволяет эффективно реализовать производственные возможности технологических систем (ТС) обработки ППД, представляющих собой динамически замкнутую систему, состоящую из станка (устройства), приспособления для установки детали, инструмента (энергонесущей среды), обрабатываемой детали, контрольных и управляющих устройств. Поэтому одним из основных направлений повышения эффективности обработки деталей методами ППД является разработка обобщенных методик проектирования операций, обеспечивающих комплексные параметры оптимизации, на основе их системно-



структурного моделирования.

Другим важным направлением совершенствования проектирования операций ППД является использование ЭВМ и САПР. Они обеспечивают сокращение сроков подготовки производства и, учитывая многовариантность решаемых в теории ППД задач, обеспечивают их оптимизацию как по одному, так и по нескольким технологическим критериям. Применение ЭВМ для решения технологических задач обработки деталей методами ППД требует, прежде всего, успешного развития обобщенной теории обработки, т.е. создания физических и математических моделей процесса ППД.

В книге изложены результаты исследований автора, проведенные им на кафедре «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета и его филиале Азовском технологическом институте.

Автор выражает благодарность за научное редактирование книги заслуженному деятелю науки РФ, д.т.н., профессору Бабичеву А.П., за оказанную помощь в проведении исследований Подольскому М.А., Мищенко Р.А., за подготовку книги к изданию Стрельцовой И.П.

1 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ППД

1.1 Назначение и способы реализации операций ППД

Любая технологическая операция, в том числе и операция ППД, осуществляется в рамках определенного маршрутного технологического процесса, обеспечивающего необходимые действия над заготовкой для получения детали определенного качества. Операции ППД включаются в ТП изготовления деталей для решения следующих задач:

- упрочнения поверхности детали при условии получения минимальной шероховатости или заданного микрорельефа;
- упрочнение детали с обеспечением максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств;
- упрочнения поверхности в условиях достижения максимально возможного исправления неточностей размеров и фор-



мы детали.

Эти задачи в процессе ППД решаются путем изменения ряда физико–механических характеристик качества и свойств материала поверхностного слоя в результате чего:

- формируется качественно новая макро – и микрогеометрия поверхности;
- в поверхностном слое возникают остаточные макро-напряжения сжатия;
- кристаллическая решетка материала поверхностного слоя получает упруго-пластические искажения, приводящие к формированию остаточных микронапряжений;
- изменяются форма, размеры и ориентировка зерен, что способствует формированию текстурированного слоя;
- в закаленных сталях снижается количество остаточного аустенита и происходит выделение мелкодисперсной карбидной фазы, повышается плотность дислокаций.

Обработка деталей методами ППД обеспечивает:

- повышение сопротивления пластической деформации при циклических эксплуатационных нагрузках;
- повышение пределов прочности и текучести, твердости и микротвердости поверхности;
- снижение характеристики пластичности.

В качестве основополагающих признаков, предопределяющих физическую сущность процесса деформирования и как следствие упрочнение поверхностного слоя методами ППД можно выделить:

- вид обрабатывающей среды или инструмента используемого для реализации процесса ППД;
- характер основного нагружения обрабатываемой поверхности деформирующим элементом инструмента или обрабатывающей средой;
- схема взаимодействия инструмента или обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью, определяющая закономерности относительного движения инструмента (обрабатывающей среды) и детали в процессе обработки.

На основе выше приведенных признаков методы ППД можно сгруппировать следующим образом.

Класс ППД – объединяет многие методы ППД, осуществляющие деформирование поверхностного слоя посредством одного и того же по физической сущности вида инструмента или обрабатывающей среды. Согласно приведенной на рис.1 классификации можно выделить класс ППД твердыми телами и класс ППД



Технология машиностроения

высокоэнергетическими концентрированными потоками (полями) энергии.

Способ ППД – определяет методы ППД, использующие один и тот же характер силового нагружения поверхностного слоя детали при его деформировании деформирующим элементом инструмента или обрабатывающей средой. Способ ППД характеризуется общностью механики деформирования поверхностного слоя обеспечивающий процесс ППД.

Так в классе ППД твердыми телами различают методы, основанные на квазистатическом способе и динамическом (ударном) способе ППД.

Квазистатические предполагают создание деформационного усилия от инструмента при непрерывном контакте с деталью. При динамических – пластическая деформация поверхностного слоя осуществляется путем многократного ударно-импульсного воздействия отдельных твердых частиц обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность.

При использовании в технологических целях физико-химических явлений, поверхностная пластическая деформация осуществляется «бесконтактным способом» – путем воздействия на поверхность обрабатывающей среды в виде высокоэнергетического концентрированного потока энергии. К числу таких методов ППД относятся: обработка в магнитном поле, взрывной волной, электронно-ионной и квантовой технологией, импульсными воздушными струями, барофрагментация. Характер силового воздействия на обрабатываемую поверхность при обработке этой группой методов может быть импульсным и постоянно – нарастающим.

Применяемые в практике процессы ППД характеризуются наличием непрерывного или дискретного контакта. Последние, представляющие в основном группу динамических методов обработки твердыми телами, могут быть разделены на процессы с регулярным и со стохастическим формированием локальных очагов деформации (отпечатков). К числу динамических методов ППД, при обработке которыми формирование локальных очагов деформации носит регулярный характер, относятся методы обработки единичным индентором или набором инденторов. Стохастический характер формирования лежит в основе динамических методов ППД направленным потоком, порционными массами и с соударением частиц обрабатывающей среды.

Метод ППД – частное решение одного из способов ППД. Например, виброударная обработка, осуществляемая обрабаты-



Технология машиностроения

вающей средой в виде стальных шариков, помещенных в закрытом объеме, подвергаемого низкочастотным колебаниям, является частным решением динамического способа ППД в классе ППД твердыми телами.

Интенсивность обработки детали при применении методов ППД, зависит от схемы обработки поверхностей, определяемой кинематикой относительного движения: для квазистатических методов – инструмента и детали, для динамических методов – обрабатывающей среды и детали, а также кинетического состояния обрабатывающей среды определяемого методы ППД.

Таким образом, операция ППД в общем случае определяется четырьмя основными признаками:

- технологическим назначением;
- способом ППД – определяющим характер силового воздействия инструмента или обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность;
- схемой обработки детали;
- типом или видом деформирующего инструмента или обрабатывающей среды.

Примеры операций ППД представлены в таблице 1.



Технология машиностроения

Т а б л и ц а 1 - Примеры операций обработки деталей методами ППД

Операция ППД	Технологическое назначение	Схема обработки	Способ ППД	Инструмент, обрабатывающая среда
Выглаживание	Упрочнение поверхностей дисков	Вращение заготовки, продольная подача инструмента	Квазистатический	Алмазный выглаживатель
Вибродударная обработка	Снижение шероховатости, упрочнение	Деталь свободна, обрабатывающая среда свободна	Ударно-импульсный, обрабатывающая среда совершает низкочастотные колебания	Стальные полированные шарики
Дорнование	Калибрование шлицев после термообработки	Деталь неподвижна, подача инструмента	Квазистатический	Фасонный дорн
Дробеструйная обработка	Упрочнение зубчатых колес	Деталь вращается, устройство для подачи потока обрабатывающей среды неподвижно	Ударный; направленный поток обрабатывающей среды	Стальная дробь
Пневмодинамическая обработка	Упрочнение внутренних поверхностей	Деталь неподвижна, подача устройства	Ударно-импульсный, обрабатывающая среда совершает хаотичные перемещения	Стальные шарики

Обработка ППД производится в условиях технологической системы (ТС), реализующей данный метод ППД в применяемом для этой цели оборудовании, с помощью соответствующего инструмента и приспособлений, действия которых конкретны, последовательны в пространстве и во времени и направлены на получение у детали поверхности с заданной точностью и качеством.

Функционально ТС упрочняющей обработки методами ППД обеспечивает взаимосвязь между первичными (входными) параметрами, рабочим процессом ППД и вторичными (выходными) параметрами (рис.3). В качестве первичных параметров вы-



Технология машиностроения

ступают точностные и качественные показатели детали (материал, размеры припуск на обработку, технические требования), а также технические характеристики средств технологического оснащения (СТО) операции, (станок или устройство, инструмент или обрабатывающая среда, приспособления для установки и закрепления детали). Такие параметры, как материал, размеры и технические условия на деталь задаются конструктором, остальные первичные параметры обосновываются технологом. Синтезирующим элементом первичных параметров выступают технологические режимы ППД.

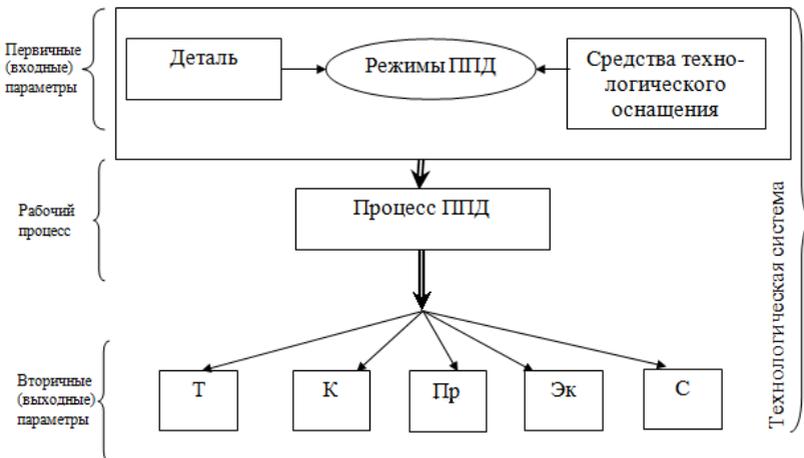


Рис.3. Технологическая система обработки деталей методами ППД

В качестве вторичных параметров выступают результаты обработки: точность-Т, характеристики качества поверхностного слоя -К, эксплуатационные свойства детали –Эк, производительность- Пр, стойкость инструмента- С. Этот перечень может быть расширен показателями энергоемкости, экономичности, экологичности, надежности технологической системы и т.д.

Подкрепленная машиностроительной практикой целесообразность проведения операций ППД для изготовления деталей с целью обеспечения требуемых параметров качества поверхности и повышения эксплуатационных свойств деталей позволяет рассматривать всю совокупность методов ППД в качестве особой группы технологических переделов (рис.2). В этой связи очень важно иметь и одно общее направление научных исследований и



Технология машиностроения

промышленных разработок по технологическим операциям, в основе которых лежит пластическая деформация поверхностного слоя. Это дает возможность получить общую физико – механическую теорию обработки ППД и на её основе создать теоретические основы совершенствования существующих методов ППД.

Такая постановка задачи отвечает и нуждам промышленности, поскольку в настоящее время инженеру-технологу в производственных условиях для рационального упрочнения деталей приходится рассматривать все методы ППД в совокупности.

Изложенные исходные положения позволяют построить четкую классификацию технологических возможностей методов ППД, получить систематизированные инженерные методики их рационального выбора для технологических процессов изготовления деталей с заданными параметрами качества поверхности и эксплуатационными характеристиками.

Содержание операций ППД включает её описание с указанием переходов, видов и режимов обработки, типа станка или устройства, приспособлений и инструмента, схемы базирования детали, степени автоматизации. Основными этапами проектирования такой операции являются:

1. Выбор метода ППД.
2. Проектирование структуры операции.
3. Разработка эскизного проекта СТО.
4. Проектирование СТО.
5. Назначение условий обработки, расчет производительности.
6. Корреляция структуры операции и СТО.

Выбор метода ППД является одним из центральных этапов проектирования операций ППД и обусловлен, с одной стороны, требованиями, предъявляемыми к детали, а с другой стороны, достигаемой экономической эффективностью обработки, которая в первую очередь определяется производительностью. Кроме того, метод ППД лежит в основе обоснования и проектирования СТО операции упрочнения. Операция ППД разрабатывается на основе требований, устанавливаемых конструктором к качеству отдельных поверхностей детали, формируемых исходя из обеспечения прочности деталей и условий их эксплуатации. В качестве исходных предпосылок в пользу принятия конструктором решения о применении обработки методами ППД являются следующие:

1. Широкие технологические возможности методов ППД
2. Возможности проведения ППД отдельных поверхностей детали разнообразных по форме и размерам, а также ППД в



труднодоступных местах.

3. Простота реализации методов ППД по сравнению с методами термического и химикотермического упрочнения.

4. Возможности встраивания методов ППД в цикл механической обработки деталей.

5. Механизация и автоматизация операций ППД.

Структура операции зависит от формы и относительного расположения требующих обработки поверхностей детали.

Таким образом, при проектировании операции ППД технолог должен найти ответы на два основных вопроса:

- какой метод ППД необходимо применить для обработки той или иной поверхности?

- как наиболее рационально построить структуру обработки детали выбранным методом ППД.

Отвечая на эти вопросы, технолог может предложить один или несколько вариантов технологических систем обработки, в которых будет реализована операция ППД, направленная на обеспечение показателей качества детали, predetermined конструктором. Но задача стоит более глубокая - разработать наиболее рациональный вариант ТС, в котором наиболее полно могут быть использованы технологические возможности выбранного метода ППД.

1.2 Структурная схема технологической системы ППД

Рациональная ТС может быть спроектирована на основе системно-структурного моделирования обработки деталей методами ППД, сущность которого заключается в следующем. ТС в общем виде представляется как совокупность совместно действующих элементов, которая предназначена для самостоятельного выполнения заданных функций. Основные элементы ТС, виды связей между ними образуют структуру, она графически изображает ее составные части и связи между ними. В структурной схеме в наглядной форме показываются отдельные элементы (явления) ТС и направления их взаимодействия. На основании структурной схемы формируется математическая модель ТС в виде совокупности зависимостей $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где n – число учитываемых параметров x . Каждый элемент структурной схемы имеет свои свойства, а в целом, ее характеризуют присущие только ей



Технология машиностроения

интегральные свойства, прежде всего технологические показатели.

Для построения структурной схемы ТС обработки методами ППД необходимо вначале определить основные закономерности функционирования ее основных частей, а также установить взаимосвязи между отдельными элементами.

Функционально, как это показано на рис.3, ТС при использовании принятого метода ППД путем изменения режимов обработки должна обеспечить заданные на операцию вторичные (технологические, технические и технико-экономические) параметры.

Вторичные параметры определяются исходя из технологических задач, решаемых операцией ППД, и обеспечения требуемых для этой операции технико-экономических показателей, таких как надежность ТС, производительность, энергоемкость процесса, материалоемкость, экономичность. В качестве основных параметров, позволяющих оценить результаты обработки и степень их соответствия уровню решаемых в процессе операции ППД технологических задач, выступают физико-механические характеристики качества поверхностного слоя и точность обработки детали.

Однако, вторичные параметры есть результат взаимодействия первичных параметров ТС, в качестве которых выступают деталь, поступающая на обработку, и средства технологического оснащения, представляющие собой материальное осуществление ТС и включающие оборудование, реализующее метод ППД, инструмент или обрабатывающую среду, приспособление для установки детали.

Деталь, являющаяся основным объектом воздействия ТС, описывается исходными параметрами: материал, геометрические размеры, физико – механические характеристики поверхности, исходная микрогеометрия, а также параметрами качества поверхности, которые она должна иметь после ППД (твердость, глубина наклепа, остаточные напряжения, микрорельеф).

При обработке методами ППД в качестве оборудования применяются или универсальные металлорежущие станки или специальные устройства, реализующие тот или иной метод. Инструмент является основным элементом ТС, взаимодействие которого с деталью обеспечивает упруго-пластическую деформацию и, как следствие, формирование поверхностного слоя с требованиями в соответствии с ТУ характеристиками. В зависимости от метода ППД функции инструмента выполняют:



Технология машиностроения

- дорны, ролики, шарики, наконечники – при обработке квазистатическими методами ППД твердыми телами.
- обрабатывающая среда, состоящая из дроби, шариков, сечки или энергонесущие бойки – при обработке динамическими методами ППД твердыми телами
- обрабатывающая среда в виде высокоэнергетически концентрированных потоков или полей энергии – при применении для ППД различного вида физических явлений.

Общим для всех методов ППД является то, что функции инструмента одни и те же, различие лишь в типе, форме и грануло - геометрических характеристиках индентора, а также их рабочей части.

Процесс ППД осуществляет взаимосвязь между первичными и вторичными параметрами, т.е. его интегральные свойства определяют закономерности функционирования ТС. Интегрально процесс ППД представляет собой сложную систему одновременно совершающихся и взаимосвязанных процессов, которые условно можно разделить на три уровня:

- процессы 1-го уровня (исходные явления) – механические, тепловые, магнитные, электрические;
- процессы 2-го уровня (процессы, протекающие в специфических для ППД условиях) – кинематика процесса, упруго-пластические деформации, трение;
- процессы 3-го уровня - структурно-фазовые, тепловые и волновые процессы, определяющие степень упрочнения поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Таким образом, в качестве основных элементов процесса ППД можно выделить:

- кинематику процесса ППД – это закономерности взаимодействия инструмента или обрабатывающей среды с обрабатываемой деталью без учета физических явлений, протекающих в зоне пластической деформации. Если для квазистатических методов ППД характер взаимодействия определяется закономерностями относительного движения инструмента и детали, то для динамических методов он определяется как кинетикой движения отдельных инденторов обрабатывающей среды, так и кинематикой относительного движения всей массы обрабатывающей среды и детали;
- механику процесса ППД – это закономерности протекания упруго-пластических деформаций обрабатываемого материала в результате силового воздействия на поверхностный слой деформирующих тел. На основе этого строятся деформационные



Технология машиностроения

модели процесса, находятся действующие напряжения, величины деформаций, сила и работа пластической деформации;

- теплофизику процесса ППД – закономерности превращения энергии в составляющих процессах различных явлений, сопровождающиеся поглощением или выделением теплоты. Теплота деформирования генерируется в очаге деформации, теплота трения – непосредственно на поверхности контакта. Она образуется в основном вследствие пластического деформирования, поэтому источник теплоты соответствует форме очага деформации, а сам процесс характеризуется мгновенным локальным нагревом и быстрым отводом теплоты внутрь заготовки. При интенсивных режимах обработки нагрев может вызывать термопластическое деформирование и другие явления, оказывающие различный эффект при ППД.

- структурно-фазовые превращения, которыми сопровождается процесс ППД, начиная от дробления зерен металла на блоки с образованием мозаичной структуры до образования зон с отличным от основного фазовым составом. Лавиноподобное развитие дислокаций-дефектов кристаллической решетки металла является основной причиной упрочнения поверхностного слоя детали в процессе ППД.

Задачи, решаемые при оптимизации технологических операций, могут быть прямые и обратные. Прямые задачи рассматривают закономерности, связывающие входные параметры с показателями механизма обработки и далее с технологическими параметрами, например влияние скорости деформирования на упруго-пластическую деформацию материала и далее на глубину наклепа поверхностного слоя. Обратные задачи отвечают на вопрос, как выбрать первичные параметры, чтобы обеспечить заданное значение технологического режима ППД. Надо отметить, что прямые задачи обычно проще. Как правило, для решения обратной задачи надо предварительно рассмотреть прямую задачу.

В этой связи, структурную схему ТС обработки методами ППД целесообразно представить в виде разомкнутой системы автоматического регулирования, состоящей из описанных выше детектирующих элементов и включенных в нее в следующем порядке: первичные (входные) параметры – процесс ППД – вторичные (выходные) параметры (рис.4) по следующим причинам.

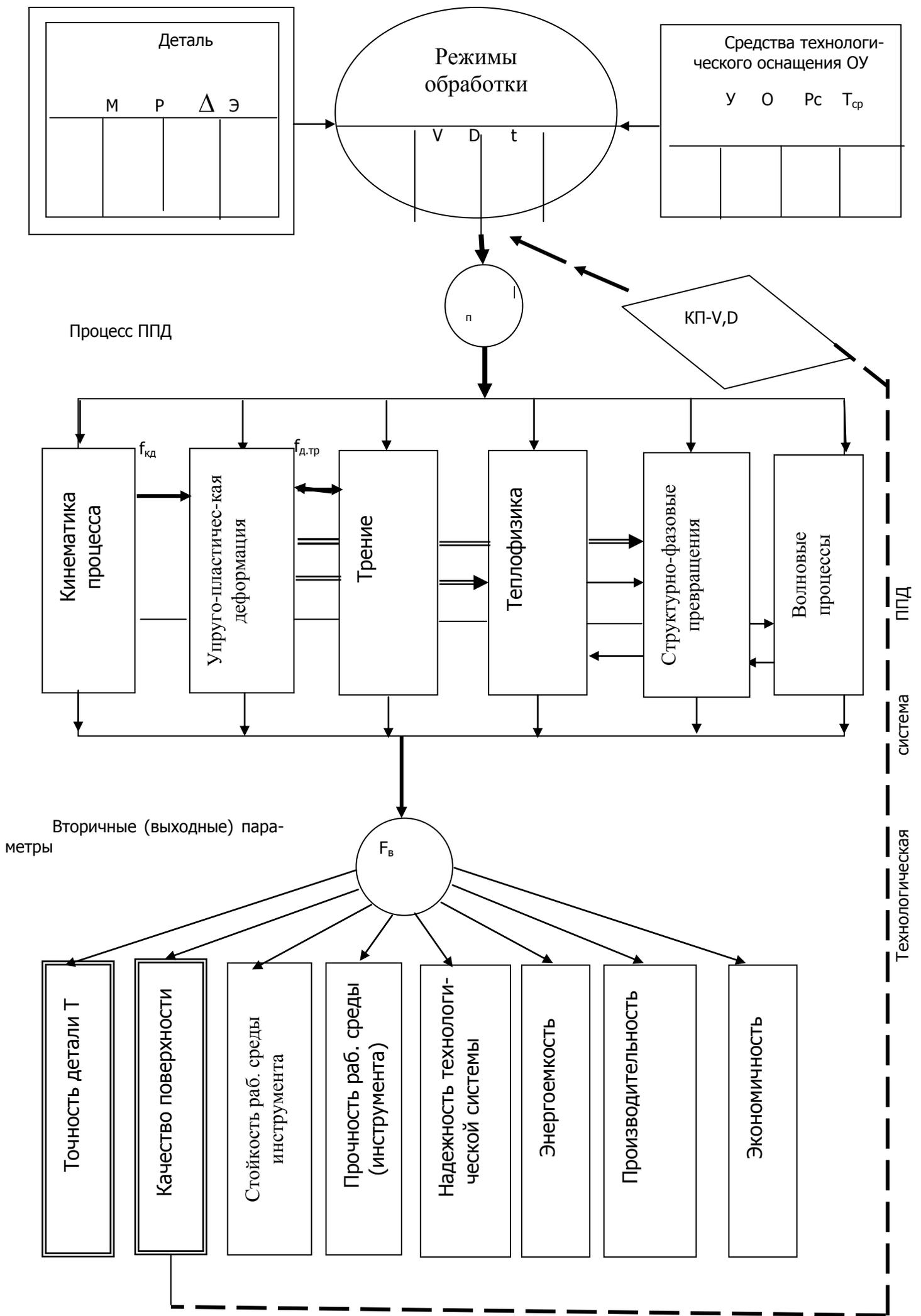


Рис.4 Структурная схема технологической системы операции ППД



Технология машиностроения

Такое построение позволяет, во-первых, выявить функциональную зависимость между элементами, а во-вторых, охарактеризовать их либо количественно, описав уравнением, связывающим входные и выходные параметры, либо качественно. Последние в математической модели учитывают в виде поправочных коэффициентов.

Кроме того, опыт практического применения обработки методами ППД свидетельствует, что управление ТС обработки построено обычно на разомкнутой схеме, представляющей совокупность управляемого объекта – процесса ППД, и управляющего, изменяющего, например, режимы обработки.

Между отдельными элементами структурной схемы ТС обработки методами ППД можно выделить два вида связей: связи в технологической системе F и связи в процессе ППД – f . Связи F в ТС являются основными, так как связывают первичные и вторичные параметры, они представляют особый интерес для практической деятельности и лежат в основе выбора оптимального варианта ТС обработки ППД.

Одной из основных функций связи является функция определяющая влияние обработки ППД на повышение эксплуатационных свойств деталей, в частности усталостной прочности. Фактически достигаемый эффект ППД определяется как отношение предела выносливости деталей после обработки к пределу выносливости деталей до обработки.

$$\beta_{\text{упр}} = \frac{\sigma_{-1\text{упр}}}{\sigma_{-1}} \tag{1}$$

Взаимосвязи второго вида между отдельными физическим явлениями, составляющими механизм ППД, существуют: односторонние, показанные на схеме одной стрелкой (например, $f_{\text{к.д.}}$ между кинематикой процесса и деформациями); двухсторонние ($f_{\text{д.тр.}}$ между деформациями и трением в контакте); комплексные, связывающие в цепочку несколько одновременно протекающих явлений (например, деформация – теплофизика – структурно-фазовые изменения). По степени важности связи можно разделить на первостепенные (например, $f_{\text{к.д.}}$ и $f_{\text{д.тр.}}$), которые лежат в основе исследований механики процесса ППД и второстепенные – позволяющие объяснить механизм упрочнения поверхностного слоя.

Структурная схема ТС операции обработки методами ППД реализует комплекс кинематических, динамических, тепловых и



Технология машиностроения

других физических связей между ее элементами. Например, кинематической связью является зависимость производительности от первичных параметров (размеров деталей, режимов обработки). Зависимость энергоемкости процесса от технических характеристик применяемого для реализации метода ППД оборудования, и состояния обрабатывающей среды устанавливается на основе анализа динамической связи ТС.

Примером тепловых связей является зависимость качества поверхности от материала обрабатываемой детали – силовых параметров процесса и структурно-фазовых явлений протекающих в поверхностном слое в процессе ППД.

Представленная структурная схема ТС носит обобщенный характер и может быть применима для проектирования операции обработки любым методом ППД. Такая постановка основывается на том, что единым обобщающим элементом метода ППД является организованная упруго-пластическая деформация, а значит единая структура механизма ППД. Предложенная для описания ТС структурная схема может быть более тщательно детализирована (расширена) или построена по иерархическому принципу для решения конкретной инженерной задачи.

Например, для обеспечения заданного качества поверхности, используя обобщенную структурную схему, на первом этапе можно выделить условия обработки (первичные параметры), обеспечивающие показатели качества по наиболее распространенному показателю – параметру шероховатости Ra. Затем построить структурную схему второго уровня, раскрывающую влияние условий обработки на другие показатели качества (глубину наклепа, величину остаточных напряжений, шероховатость).

Построение ТС методами ППД в виде разомкнутой схемы предусматривает в качестве объекта регулирования первичные параметры и использование любого из них для оптимизации процесса ППД. Однако, в первую очередь в качестве регулятора процесса ППД используют режимы обработки. Обработка на оптимальных режимах обеспечивает наиболее производительное и экономичное ППД с выполнением заданных ограничений как первичных (детали, СТО), так и вторичных (качество поверхности, точность).

Представление ТС обработки методами ППД в виде структурной схемы способствует более ясному пониманию физической сущности процесса ППД, и на этой основе построению достоверной математической модели ТС, позволяющей спроектировать оптимальный вариант операции ППД, используя несколько показателей оптимизации.



1.3 Обобщенная модель проектирования операций ППД

Построение достоверной математической модели операций напрямую связано с правильным выбором конструктивных, физико-механических и технологических ограничений. Типовыми конструктивными ограничениями для упрочняющей обработки методами ППД являются энергетические возможности устройств или оборудования, применяемого для реализации того или иного метода, геометрические параметры охватываемых зон обработки, которые в ряде случаев снижают эффективность операций. Повысить эффективность процесса при такой ситуации возможно путем конструктивных, технологических или организационно-производственных мероприятий. Вместе с этим ряд ограничений, таких как геометрические и прочностные характеристики детали, точность и качество её поверхности, являются неизменными для данной операции. Общепринятые методы проектирования технологических операций обеспечивают их оптимизацию по одному заданному критерию (себестоимость, производительность и т.д.).

Современный подход к изучению сложных систем связан с имитационным моделированием, позволяющим решать задачи многоцелевой оптимизации[1].

Основными элементами системного проектирования технологических операций, в которых используют имитационный анализ являются:

1. Формирование целей и задач проектирования.
2. Создание полного набора альтернативных вариантов.
3. Воспроизведение значений критериев оценки (имитационное моделирование).
4. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов.
5. Выбор оптимального технологического процесса.

Применяя этот подход, цель и задачи, степень достижения которых предстоит оценивать в процессе проектирования операций ППД, можно представить в виде графа целей и задач.

Целью нулевого ранга ω^0 является оптимальная ОУ ППД. Цели первого ранга предусматривают обеспечение:

- заданных технологических показателей качества обрабатываемых деталей – ω_1 ;



- заданных технологических показателей процесса ППД – ω_2' ;
- оптимальных экономических и экологических показателей операции – ω_3' .

Задание на операцию показателей качества деталей позволяет обосновать группу частных критериев второго ранга $y_i \in \{1, \dots, m\}$, формируемых в процессе ППД, таких как характеристики микропрофиля y_1' , точность y_2' , физико – механические свойства y_3' , эксплуатационные свойства деталей y_4' .

Технологические показатели процесса ППД ω_2' оцениваются по критериям y^2 : производительность – y_1^2 , энергоёмкость – y_2^2 , материалоемкость – y_3^2 , степень автоматизации – y_4^2 , надёжность ТС – y_5^2 .

Опыт применения машинной имитации для воспроизведения достоверных значений критериев оценки процесса обработки свидетельствует о том, что с её помощью появляется возможность замены весьма трудоёмких и дорогостоящих натуральных экспериментов, экспериментами, выполняемыми на вычислительных машинах.

Общая схема проектирования операции с использованием имитационной модели процесса показана на рисунке 5.

Имитационная модель операции использует три основных вектора:

- вектор входных параметров \bar{A}
- $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_5\}$ представляет параметры операции, которые не меняются в процессе использования расчетной модели:
 - a_1 – физико – механические свойства обрабатываемой детали;
 - a_2 – размеры и форма детали;
 - a_3 – исходная шероховатость поверхности детали;
 - a_4 – точность детали, достигнутая на предшествующей операции;
 - a_5 – прочностные и



Технология машиностроения

- износостойкостные характеристики материала инструмента.

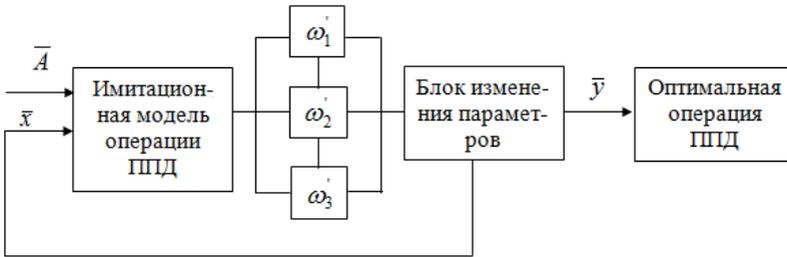


Рис.5. Схема имитационного моделирования при проектировании операции \bar{E}

- вектор управляющих параметров $\bar{x} = \{x_1, \dots, x_4\}$ включает параметры, которые должны выбираться для реализации постоянной технологической задачи из множества допустимых векторов \bar{X} . Управляющими параметрами являются: режимы обработки – x_1 , тип оборудования или устройства – x_2 , тип и размеры инструмента – x_3 .

- вектор выходных параметров операции \bar{y} представляют 2 группы параметров: частные критерии, характеризующие показатели качества детали после обработки – y_i и частные критерии, характеризующие технический уровень операции – y_i^2 . Частные критерии оценки операции являются выходными параметрами модели.

Имитационная модель операции ППД может быть представлена пятью взаимосвязанными моделями (рис.6):

1. Модель механики процесса ППД.
2. Модель проектирования ОУ ППД на основе упругих деформаций технологической системы (для квазистатических формообразующих методов ППД).
3. Модель прогнозирования геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя.
4. Модель прогнозирования эксплуатационных свойств деталей.
5. Модель выбора и проектирования СТО.
6. Модель выбора метода ППД и схемы упрочнения



детали.

Имитационная модель процесса позволяет оптимизировать значения частных критериев оценки y_i^1, y_i^2 с использованием принципа декомпозиции, а также производить выбор оптимального варианта операции ППД на основе значений критериев оценки операции при различных уровнях.

При оптимизации операции ППД решаются две задачи: определение оценки этих критериев и разработка методики выбора предпочтительного варианта операции по этим оценкам, т.е. решение задачи многоцелевой оптимизации. Каждое из допустимых альтернативных решений $\bar{x} \in X$ приводит к некоторому исходу $\bar{y} \in Y$, последствия которого оцениваются набором скалярных критериев $\omega_1^1, \omega_2^1, \omega_3^1, y_i^1, y_i^2$, характеризующих степень достижения целей. Вектор $\bar{\omega}(\omega_1^1, \omega_2^1, \omega_3^1, y_i^1, y_i^2)$ связан с решением $\bar{x} \in X$, некоторым отображением $\bar{\omega} \in \bar{\omega} : X \rightarrow \omega$, где ω – пространство критериев оценки. Необходимо найти такое допустимое и наилучшее решение $\bar{x}_0 \in X$, которое оптимизирует эффективность $\bar{\omega} \in \bar{\omega}$. В этом случае модель оптимизации имеет вид

$$\bar{\omega} \in \bar{\omega} \underset{X}{=} \text{opt} \bar{\omega} \in \bar{\omega}, \bar{x} \in X,$$

где opt – оператор оптимизации, определяющий принцип выбора наилучшего решения из всех допустимых.

Сущность моделей входящих в состав имитационной модели, используемой при проектировании операций методами ППД заключается в следующем.

Модель механики процесса ППД (рис.6) характеризует упруго – пластические деформации обрабатываемого материала, а также процессы трения в зоне контакта деформирующего индентора с поверхностью обрабатываемого материала. Входными параметрами A_1 используемой модели являются характеристики микропрофиля исходной поверхности (Rz – высота микронеровностей, b, v – параметры опорной кривой), физико – механические характеристики обрабатываемого материала детали (γ – плотность, ξ – коэффициент податливости, σ_d – динамический предел текучести).



Технология машиностроения

Параметрами управления X_1 являются сила вдавливания индентора инструмента (P) или скорость соударения индентора обрабатываемой среды (V) и его размеры (d – диаметр), кратность покрытия поверхности следами ударов (l). Исходя из них, на основе принятой расчетной схемы теоретически определяются параметры пластической деформации поверхностного слоя.

Выходные параметры модели Y_i являются внутренними параметрами ТС обработки ППД. К ним относятся формируемые на обрабатываемой поверхности в процессе ППД геометрические параметры локального очага деформации (a – радиус, λ – глубина отпечатка), а также значение минимальной скорости деформирующих инденторов, обеспечивающие пластическую деформацию поверхностного слоя детали (V_{\min}).

Использование структурной схемы также позволяет наиболее рационально решать технологические задачи, поставленные перед обработкой ППД, выявляя ее узкие места. Так с целью повышения к.п.д. процесса ППД в работе [7] был предложен гидродробеструйный метод ППД, позволивший снизить трение в зоне контакта деформирующих тел с обрабатываемой поверхностью за счет применения в качестве энергоносителя обрабатываемой среды СОЖ.

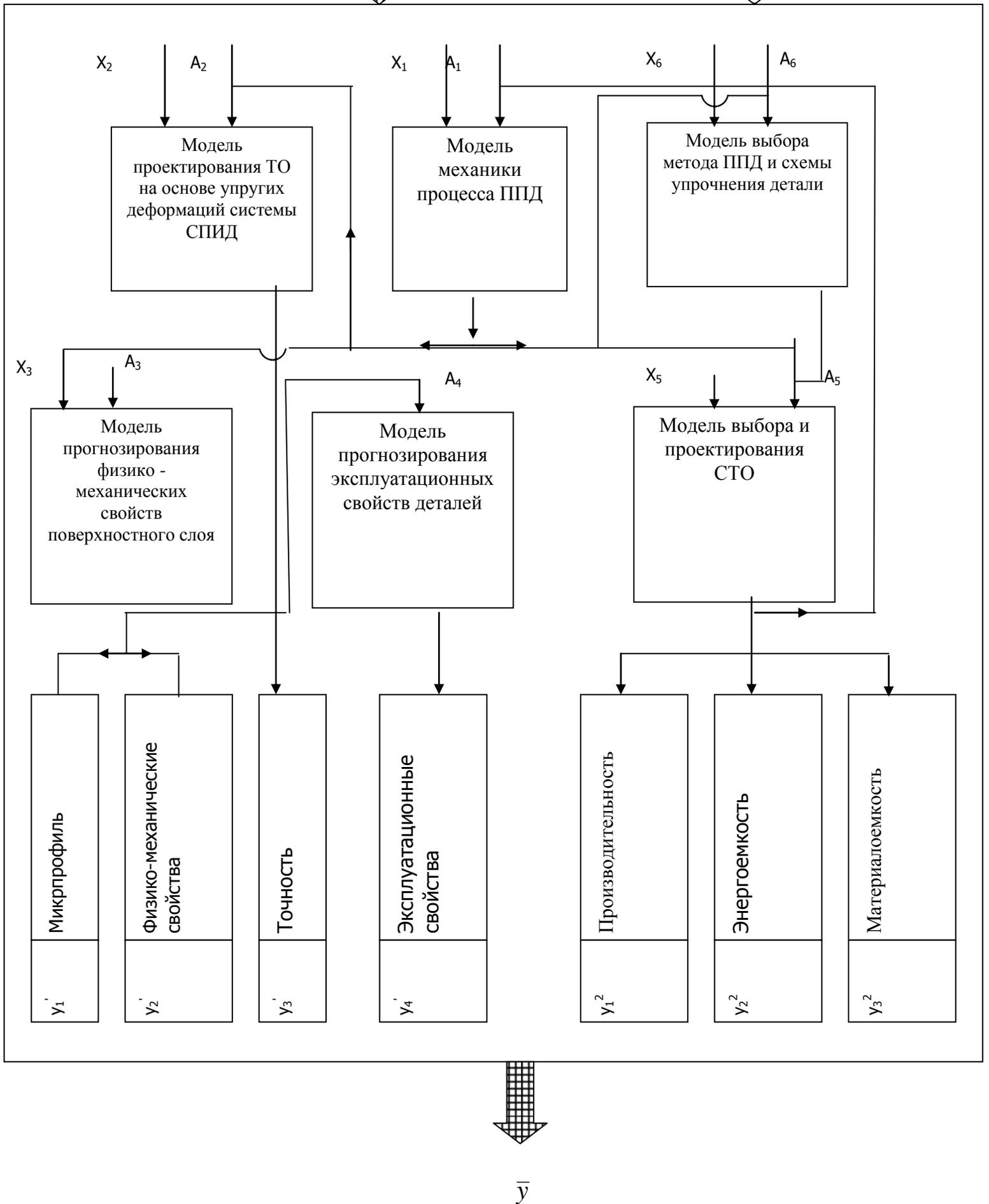
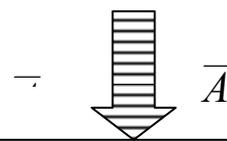
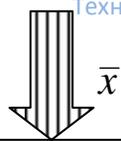


Рис.6. Обобщенная имитационная модель проектирования операции ППД



Модель выбора метода и схемы ППД детали является основополагающей в процессе проектирования операций ППД. Модель предусматривает:

1) определение комплекта участков поверхности детали, требующих обработки методами ППД;

2) выбор метода (методов) ППД наиболее предпочтительного с точки зрения обеспечения энергосиловых параметров и кинематических связей процесса ППД, для обработки выбранного комплекта участков поверхности;

3) обоснование схемы ППД детали, обеспечивающей формирование наиболее рациональной структуры операции ППД.

Входными параметрами этой модели A_6 являются геометрические размеры детали, требования по физико – механическим характеристикам поверхностей детали вытекающие из технических условий, минимально допустимые энергосиловые параметры обеспечения процесса ППД (P_{min}, V_{min}) определяемые на основе физико-механических и геометрических характеристик поверхностного слоя исходной детали, объем выпуска деталей, характеристика производственных условий реализации операций ППД.

В качестве параметров управления X_6 выступают методы ППД (рис.1), которые предварительно представляются или в виде систематизированных таблиц раскрывающих их энергетические, конструктивные и технологические возможности и составляемых на основе данных изложенных в технической литературе [6] или создания «банка» методов ППД с использованием ЭВМ.

Комплект поверхностей для ППД формируется на основе анализа технических требований, предъявляемых конструктором к качеству поверхностей детали. При этом определяется форма и размеры поверхностей требующих по ТУ обработки методами ППД, а также их сочетания. Исходя из технологических соображений реализации ППД детали, предусмотренной конструкторской документацией, комплект поверхностей может быть расширен при условии, что ППД дополнительно включенных в комплект поверхностей не оказывает влияние на служебное назначение детали. Решение вопроса выбора метода и схемы ППД в целом представляет многовариантную с практической точки зрения задачу. Однако сложность ее решения зависит от условий, в которых проектируется операция ППД.

Так при проектировании операции ППД в привязке к реализуемому на предприятии методу ППД решение этой задачи сво-



Технология машиностроения

дится к оценке приемлемости его для обработки детали. В случае пригодности вопрос лишь заключается в рациональном построении схемы ППД. В случае не пригодности его для реализации требований предъявляемых к детали конструктором или разработки перспективной операции ППД вопрос может быть решен двумя путями.

Первый путь предусматривает:

1) Выбор из множества методов ППД, обеспечивающих обработку каждой поверхности входящей в комплект.

2) Определение из выбранных методов ППД применимых для большинства поверхностей, входящих в комплект.

3) На основе анализа реализуемых ими схем обработки, выбор метода и схемы ППД, обеспечивающей наибольшую производительность, характеризующую технологическим временем обработки.

Методологические основы этого пути выбора метода и схемы ППД изложены в работе [4].

Второй путь основан на том, что вначале определяется схема ППД комплекта поверхностей, а затем выбирается для ее реализации метод (методы) ППД. Из этого следует, что единых правил выбора метода и схемы ППД детали, обеспечивающих однозначное решение этой задачи для каждой конкретной детали нет. Как тот, так и другой путь, могут быть приняты за основу. Вместе с тем, как будет показано в следующих разделах, есть ряд рекомендаций, позволяющих технологу найти для каждой детали или группы деталей возможно лучшее решение этой ответственной задачи.

Модель выбора и проектирования средств технологического оснащения предполагает конструктивное обоснование совокупности функционально взаимосвязанных технических средств выполнения операции ППД. К ним относится устройство, реализующее выбранный метод ППД, обрабатывающая среда, приспособление для установки детали. СТО обеспечивают ППД поверхностей детали в соответствии с выбранной для данного метода схемой, а также протекание процесса ППД в условиях, при которых требуемое качество детали достигается с максимальной возможной производительностью при относительно минимальных их энергоемкости и материалоемкости.

Энергоемкость и материалоемкость СТО представляют собой выходные параметры модели и являются ограничительным фактором оптимизации операции ППД. В качестве входных параметров модели A_5 выступают выбранный метод ППД, размеры об-



Технология машиностроения

рабатываемой детали, схема обработки, технологическое время обработки, допустимый диапазон энергосиловых параметров процесса ППД. Параметрами управления X_5 являются принципиальные и кинематические схемы устройств реализации методов или их типовые конструкции, схемы установки детали при обработке.

Любая совокупность СТО, применяемая для обработки методами ППД, должна обеспечивать, во-первых, необходимые для проведения ППД энергетические характеристики обрабатывающей среды, а во-вторых, кинематику формирования поверхностного слоя в процессе выполнения операции ППД, согласующуюся с выбранной схемой обработки.

На основе принятого метода и схемы ППД разрабатывается эскизный проект СТО обработки конкретной детали, наглядно иллюстрирующей кинематические и динамические связи между устройством, реализующим метод, обрабатывающей средой, обрабатываемой деталью, приспособлением (рис.7). В ходе эскизной проработки ТС выявляются основные технические характеристики, которым должны удовлетворять СТО для проведения операции ППД в соответствии с ее технологическим назначением. Так, применительно к устройствам в качестве таковых формулируются обеспечение требуемых энергосиловых параметров обрабатывающей среды (скорость инденторов), геометрические размеры зон обработки, охватываемых обрабатывающей средой, минимально допустимое расстояние до источника энергии, габаритные размеры устройства, скорость перемещения устройства относительно детали и т.д. Используя эти технические характеристики, технолог для реализации в операции выбранного метода ППД может или выбрать устройство из числа типовых изготавливаемых специализирующимися в этой области организациями или разработать техническое задание на проектирование и изготовление нового, если типовые конструкции по ряду технических или экономических показателей не приемлемы.



Технология машиностроения

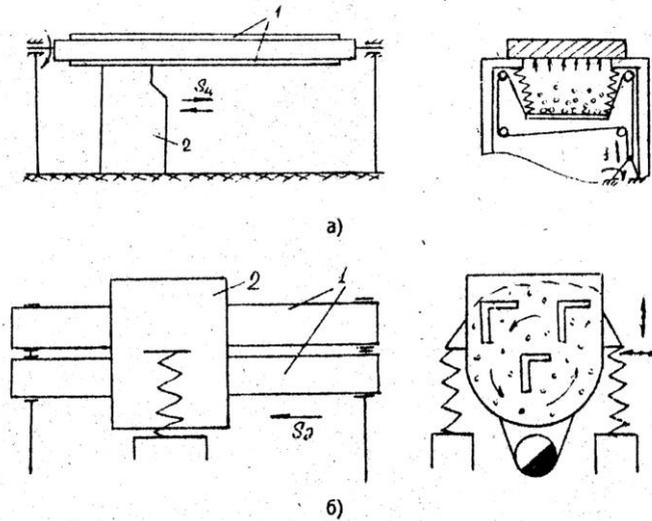


Рис.7. Эскизные проекты технологических схем ППД:
а – плоских длинномерных деталей ударно – импульсным методом ППД

(1 – деталь, 2 – устройство для ударно – импульсной обработки, 3 – приспособление для установки детали); б - длинномерных деталей виброударным методом ППД
(1 – деталь, 2 – устройство для виброударной обработки)

В основе технического задания на проектирование должен быть заложен один из наиболее предпочтительных вариантов принципиальной схемы устройства соответствующий выбранному для операции методу ППД.

Разработку и выбор такой схемы устройства в работе [2] предлагается вести в форме диаграммы идей, с помощью которой варианты решений представляют в виде графической классификации. Применение диаграммы при поиске идей систематизирует его, делает более наглядным, допускает корректировку и развитие, что важно при рассмотрении проекта. На рис.8 представлена типичная диаграмма идей принципиальных схем устройств для упрочнения отверстий пневмодинамическим методом ППД.

Кроме того, на основе моделирования кинематических связей устройства реализующего метод ППД технолог в техническом задании должен сформулировать ряд дополнительных специфических для выбранной схемы устройства параметров, которые должны быть положены в основу на этапе его последующего



Технология машиностроения

конструирования с целью обеспечения оптимальной энергоёмкости и материалоемкости устройства. В качестве примера на рис.9 приведена модель выбора основных конструктивных и энергетических параметров устройства для ударно-импульсного упрочнения (рис.7а), оказывающих наиболее существенное влияние на конструкцию устройства и, как следствие, показатели ее энергоёмкости и материалоемкости, такие как высота рабочей зоны H_0 , мощность привода – N_y , размеры входного звена привода гибкого элемента – $R_{вх}$.

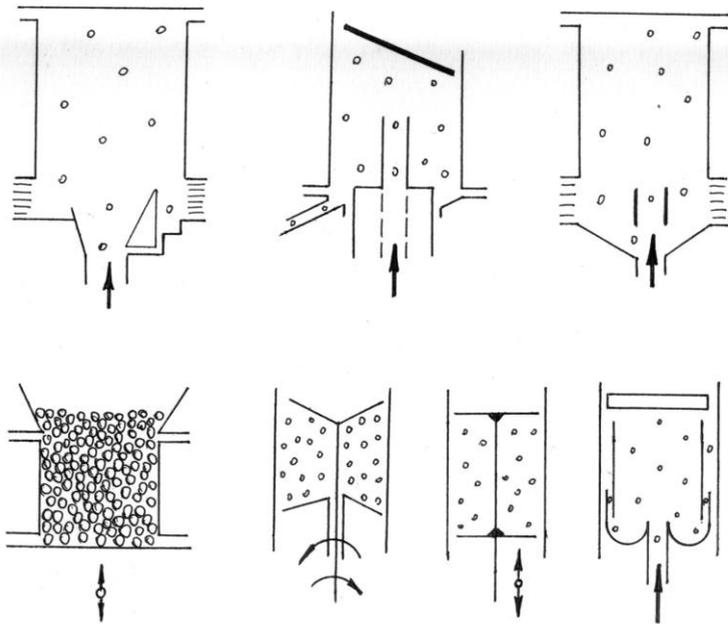


Рис.8. Принципиальные схемы устройств для упрочнения отверстий пневмодинамическим методом ППД

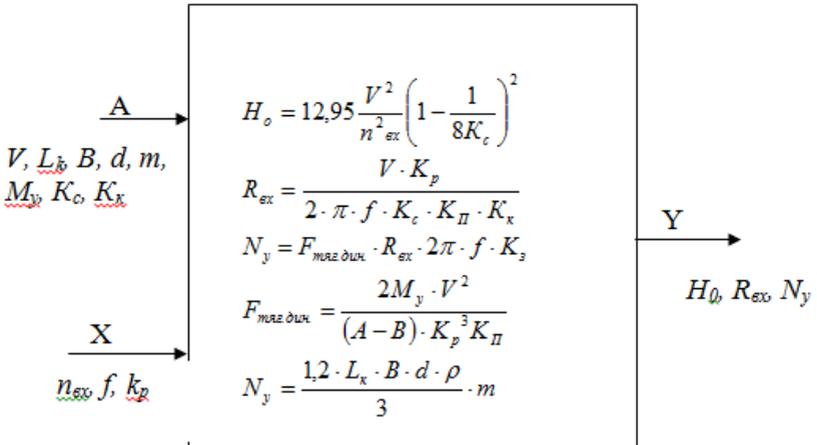


Рис.9. Модель обоснования основных конструктивных и энергетических параметров устройства для ударно-импульсного упрочнения

Исходными параметрами модели ударно– импульсного устройства (УИУ) являются минимальная скорость инденторов обрабатывающей среды (V), ширина и длина зоны обработки детали (L_k, B), масса загрузки (M_y) зависящая от размера инденторов обрабатывающей среды, их плотности (ρ) и количества слоев загрузки в камеру (d и $m=4$), коэффициент запаса мощности (K_3), коэффициент потерь (K_{II}), коэффициент согласования скорости (K_c), кинематический коэффициент (K_x). Регулируемыми параметрами модели УУ выступают число оборотов и частота вращения входного звена привода (n_{ex}, f), коэффициент раскрытия гибкого элемента (K_p).

Выбор типа и гранулометрических характеристик инденторов обрабатывающей среды непосредственно зависит от материала детали, качества исходной поверхности, а также технологического назначения обработки методами ППД. Так, например, использование в качестве инденторов обрабатывающей среды стальных полированных шариков, несмотря на то, что они обладают высоким качеством поверхности, позволяют обеспечить высокие энергосиловые параметры процесса ППД и физико-механические характеристики поверхностного слоя, не приемлемо для упрочнения алюминиевых конструкций летательных аппаратов, так как в результате их шаржирования металлическими частицами снижаются эксплуатационные свойства. Во избежание



Технология машиностроения

этого недостатка упрочнение алюминиевых конструкций целесообразно осуществлять однородными по материалу инденторами.

Модели прогнозирования физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств деталей, позволяют моделировать влияние технологических режимов на характеристики качества поверхностного слоя при реализации операций ППД, а так же оценить их влияние на повышение эксплуатационных свойств деталей. На базе этих моделей проводится оптимизация как ТС, так и операций ППД, поскольку требования к качеству поверхности являются тем критериальным фактором, на обеспечение которого нацелены ТС обработки методами ППД.

Входными параметрами этих моделей являются физико-механические характеристики исходной поверхности детали, а в качестве параметров управления X_3 выступают режимы обработки (V, d, t) и условия протекания процесса ППД в результате которых на поверхности формируется качественно новый поверхностный слой представляющий собой совокупность локальных пластических отпечатков.

В п.п.1.2 приведена интегральная модель позволяющая оценить в совокупности влияние обработки методами ППД на повышение усталостной прочности. В этой связи следует отметить экспериментально подтвержденный факт, что повышение усталостной прочности деталей является одним из эффективных технологических назначений операций ППД.



1.4 Принципы разработки рациональной структуры операции ППД

Структура операции описывает её содержание с указанием перечня и последовательности выполнения технологических и вспомогательных переходов операции, а также потоков деталей. Она реализуется в рамках конкретной ТС, обеспечивающей рациональную совокупность указанных элементов операции. Рациональная структура операции обеспечивает заданные на операцию технологические показатели с максимальной технико-экономической эффективностью.

Рациональная структура операции может быть построена или на основе совершенствования ТС или рационального построения операции. Особенности и специфика ТС, используемых для реализации операций ППД, свидетельствуют о предпочтении второго направления, при котором проектирование ТС осуществляется как следствие оптимальной технологической операции ППД.

Операция ППД определяется применяемым методом ППД и структурой операции, поэтому её совершенствование должно осуществляться в гармонической взаимосвязи. Закономерности построения оптимальной операции ППД определяются на основе анализа и синтеза её структурной схемы, которая позволяет установить связь между качественно различными структурами и методами ППД, а на этой основе определить количественные показатели и, прежде всего, условия достижения максимальной производительности или минимальной себестоимости.

Для решения этой задачи воспользуемся схемой, представленной на рис.10.

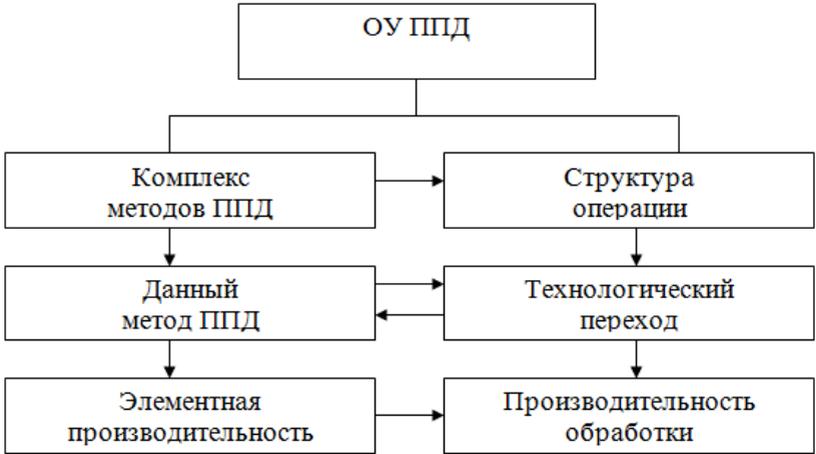


Рис.10. Схема проектирования операций ППД

В основе формирования структуры операций лежит схема ППД детали выбранным для этой цели методом. В качестве основных схем обработки, реализуемых методами ППД можно выделить следующие:

1. Деталь свободна; обрабатывающая среда одновременно охватывает все доступные для ППД поверхности детали.

2. Деталь неподвижна; обрабатывающая среда охватывает только одну предусмотренную для ППД поверхность детали или их сочетание.

3. Деталь последовательно занимает ряд фиксированных положений относительно обрабатывающей среды; обрабатывающая среда в фиксированном положении охватывает предусмотренную для ППД в этом положении поверхность детали.

4. Деталь и инструмент (обрабатывающая среда) совершают относительные движения, в результате чего осуществляется формирование поверхностного слоя детали.

5. Комбинированная обработка, представляющая сочетание 3 и 4 схем.

6. Деталь неподвижна или занимает ряд последовательных фиксированных положений относительно деформирующего инструмента; инструмент осуществляет ППД локальных участков поверхности детали.

Методы реализации основных схем ППД представлены в таблице 2



Технология машиностроения

№	Схема ППД	Иллюстрация схемы ППД	Метод ППД
1	2	3	4
1	<p>Деталь свободна; обрабатывающая среда одновременно охватывает все доступные для ППД поверхности детали</p>		<p>Вибрационная ударная обработка; ударно-барабанная обработка</p>
2	<p>Деталь неподвижна; обрабатывающая среда одновременно охватывает только одну ориентированную относительно её и предусмотренную для ППД поверхность или их сочетание</p>		<p>Все динамические методы ППД и методы ППД концентрированными потоками</p>



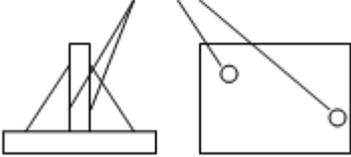
Продолжение таблицы 2

<p>3</p>	<p>Деталь занимает последовательно ряд фиксированных положений; обрабатывающая среда обрабатывает по схеме 2</p>		<p>Все динамические методы ППД и методы ППД концентрированными потоками</p>
<p>4</p>	<p>Деталь и инструмент (обрабатывающая среда) совершают относительное движение</p>		<p>Квазистатические методы ППД; динамические методы ППД и методы ППД концентрированными потоками при обработке крупногабаритных деталей</p>
<p>5</p>	<p>Комбинированная, представляющая сочетание 3 и 4 схем</p>		<p>Виброобкатывание, вибровыглаживание</p>

Продолжение таблицы 2



Технология машиностроения

6	<p>Деталь неподвижна или занимает ряд фиксированных положений; инструмент осуществляет упрочнение локальных участков поверхности</p>	<p>Места локального упрочнения</p> 	<p>Обработка шарикостержневыми упрочнителями; пневмодинамическая обработка</p>
---	--	---	--

Введем понятие **элементарной производительности** операции, которая определяется временем, связанным с режимами обработки, используемыми на технологическом переходе операции ППД.

Под технологическим переходом обработки детали методами ППД понимается законченная часть операции ППД, выполняемая над одной или несколькими поверхностями детали одним или несколькими инструментами или потоками обрабатывающей среды за один рабочий ход инструмента или за промежуток времени силового воздействия обрабатывающей среды без изменения режимов обработки.

Назовем поверхность или поверхности, формируемые конкретным методом ППД в процессе технологического перехода операции **элементарным участком ППД**. При этом продолжительность воздействия обрабатывающей среды определяется исходя из обеспечения требуемых показателей качества детали или достижения наибольшего эффекта упрочнения.

Из анализа схем ППД, реализуемых существующими методами ППД, следует, что элементарным участком ППД может быть вся совокупность доступных для обработки поверхностей детали, отдельные поверхности детали или их сочетание, места сопряжения поверхностей, а также локальные участки, соизмеримые с геометрическими размерами пластических отпечатков, формируемых в результате воздействия единичного или набора обрабатывающих инденторов.

Таким образом, операция ППД может предусматривать обработку детали как за один технологический переход путем формирования на ней одного элементарного участка, так и за несколько технологических переходов, в результате которых формируется два или три элементарных участка ППД одного или разных



Технология машиностроения

типоразмеров. В первом случае операция будет представлять собой одноэлементную обработку, во втором – многоэлементную.

Элементная производительность $\Pi_э$ является количественной характеристикой применяемого для обработки метода ППД. Приведенная на рис.4 структурная схема технологической операции ППД предполагает одноэлементную обработку детали и позволяет оптимизировать условия выполнения операции выбранным методом ППД.

Использование при разработке операций ППД методов, позволяющих в рамках одной операции путем одноэлементной обработки обеспечить требуемые показатели качества детали, является одним из основных резервов повышения производительности. Повышение производительности при многоэлементной операции может быть достигнуто путем многодетальной и многопоточной обработки деталей. При многоэлементной операции (с использованием одного или нескольких методов ППД) показателем производительности Π является оперативное время.

Оперативное время t_{on} характеризует длительность производственного цикла операции $T_ц$ и определяется промежуток времени, за который технологическая система обрабатывает деталь или партию деталей. Поэтому при однопоточной обработке методами ППД $t_{on} = T_ц$, а при одновременной обработке нескольких деталей оперативное время t_{on} на одну деталь

$t_0 = \frac{T_ц}{n_д}$, где $n_д$ - число одновременно обрабатываемых деталей.

Оперативное время является количественной характеристикой структуры операции ППД, характеризующей операционную производительность $\Pi_{on} = \frac{1}{t_{on}}$. Фактическая производительность операции меньше и определяется с учетом штучного времени

мени $\Pi = \frac{1}{t_{um}}$.



Технология машиностроения

Технологический переход представляет собой законченную часть операции, в процессе которой формируется новый поверхностный слой детали с заданными показателями точности и качества. Следовательно, оперативное время, затрачиваемое на выполнение операции ППД (её трудоемкость), можно представить как сумму времен, затрачиваемых на формирование отдельных элементных участков ППД детали.

$$t_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{эл.}i} ; t_{\text{э.}i} = t_{\text{о.э.}i} + t_{\text{в.э.}i},$$

где $t_{\text{о.э.}i}$ – время, затрачиваемое на ППД i – элементного участка; $t_{\text{в.э.}i}$ – время, затрачиваемое на перемещение или изменение относительного положения инструмента (или направления действия обрабатывающей среды) и детали для ППД следующего элементного участка детали.

Если операция ППД представляет собой одноэлементную обработку, то все значения приведенных времен совпадают, т.е. $t_{\text{э.}i} = t_{\text{оп}}$; $t_{\text{о.э.}i} = t_{\text{о}}$; $t_{\text{в.э.}i} = t_{\text{в}}$, при этом основное время зависит от режимов обработки и, применительно к схемам ППД 1и 2 (табл.2), реализуемыми динамическими методами ППД, в общем виде может быть определено:

$$t_{\text{о}} = \frac{i}{Pf}, \tag{2}$$

где i – кратность соударения деформирующих тел обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью; P – вероятность формирования упрочненной поверхности, определяемая режимами обработки и кинетикой движения деформирующих тел; f – частота взаимодействия обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью.

Для схемы ППД 3 (табл.2), используемой при применении как квазистатических, так и динамических методов ППД:

$$t_{\text{о}} = \frac{l}{nS_{\text{о}}} \text{ или } t_{\text{о}} = \frac{l}{S_{\text{м}}} \tag{3}$$

где l – протяженность элементного участка ППД; $S_{\text{о}}$ – подача инструмента или детали; n – число оборотов детали,



Технология машиностроения

об/мин; S_m – подача детали или обрабатываемой среды.

Производительность операции ППД при обеспечении заданного качества деталей определяется совершенством применяемых методов ППД (характеризуемых $\Pi_э$) и структурой операции (характеризуемой Π). Отношение $\Pi_э/\Pi$ определяет степень концентрации операции ППД. $\Pi_э/\Pi = 1$ обеспечивает одноэлементная операция ППД.

Структура операции ППД характеризуется совокупностью технологических, вспомогательных переходов и потоков и связями между ними. Возможны два типа структур:

- простая, предусматривающая одноэлементную обработку детали;
- сложная, предусматривающая многоэлементную обработку путем последовательного или параллельного формирования элементных поверхностей ППД.

Для обоих типов структур обработка может быть однопоточной и многопоточной. Кроме того, операция ППД может осуществляться по однодетальной и многодетальной схеме. В обоих случаях число потоков n_n или число одновременно обрабатываемых деталей $n_д$ определяется исходя из годового фонда времени $\Phi_г$ и годовой программы N . Они определяют такт выпуска

$$T_в = \frac{\Phi_г}{N}.$$

$$n_д = n_n = \frac{T_ц}{T_в}. \tag{4}$$

где $T_ц$ – рабочий цикл операции; при однопоточной и однодетальной обработке равный $t_{он}$.

Классификацию структур операций ППД удобно производить по составу структурных элементов ТС, методу совмещения технологических и вспомогательных перемещений в пространстве и времени. Первый признак определяет класс структуры операции ППД. Структура операции ППД определяется числом одновремен-



Технология машиностроения

но обрабатываемых деталей (классы однодетальной D_1 и многодетальной структур D_n) и числом одновременно работающих инструментов или потоков обрабатывающей среды (классы одно – I_1 и многоинструментальных структур I_n). Сочетание этих двух составных элементов ТС определяет подклассы структур операций ППД, например, подкласс однодетальной одноинструментальной структуры $D_1 - I_1$, однодетальной – трехинструментальной структуры $D_1 - I_3$.

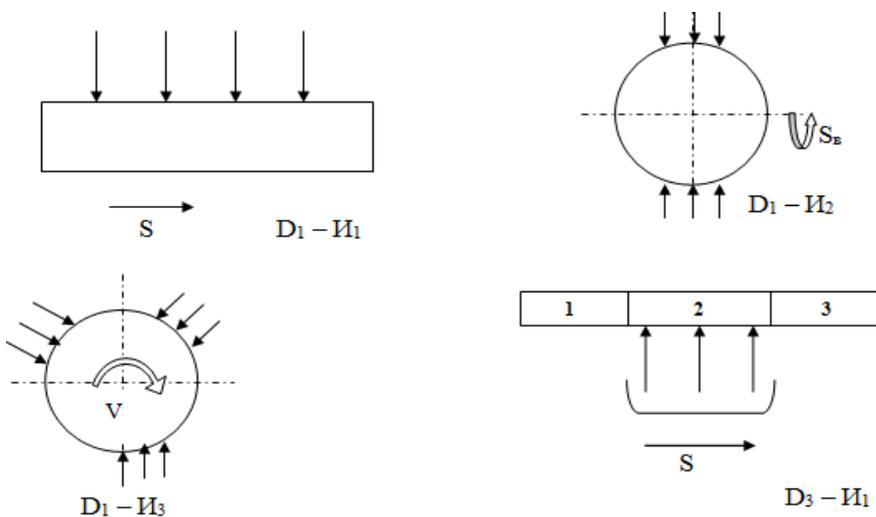


Рис.11. Подклассы структур операций ППД

Второй признак характеризует метод совмещения в пространстве и во времени перемещений взаимодействующих между собой элементов ТС – детали и инструмента или обрабатывающей среды. Для операций ППД оно может быть последовательным (принцип дифференциации структуры операции) или параллельным (принцип концентрации структуры операции). Последовательная структура операции ППД предполагает дифференциро-



Технология машиностроения

ванное последовательное формирование элементарных участков ППД детали одним инструментом или потоком обрабатывающей среды. Параллельная структура операции ППД строится на основе концентрации обработки детали несколькими инструментами и потоками обрабатывающей среды. При реализации параллельной структуры операции ППД элементарная производительность пропорционально уменьшается.

При последовательной структуре ОУ ППД возникает необходимость перемещения инструмента или обрабатывающей среды при переходе с одного элементарного участка на другой. Таким образом, операционное время складывается из основного и вспомогательного времени $t_{on} = t_0 + t_e$.

При параллельной структуре $(D_1 - I_2)(D_1 - I_3)$ операцию строят на основе формирования одного или одновременно нескольких элементарных участков, которые в совокупности можно представить как один общий элементарный участок ППД детали. При этом условия ППД каждого отдельного элементарного участка должны быть одинаковыми. Основное время в этом случае определяют усреднено

$$t_0 = \frac{t_{0i}}{n_H}, \tag{5}$$

где t_{0i} – основное время ППД i – м инструментом или потоком,

n_H – количество одновременно работающих инструментов или потоков.

Вспомогательное время представляет собой сумму времен, затрачиваемых на контроль, съем и установку детали, а также на изменение положения детали.

Схема взаимодействия детали и инструмента (обрабатывающей среды) в пространстве и во времени существенно влияет на структуру операции ППД. Так, замена прерывистого перемещения детали при обработке элементарных участков в процессе ППД или потока обрабатывающей среды на непрерывное – способствуют улучшению структуры операции ППД, особенно при обработке длинномерных и крупногабаритных деталей. В этом случае можно использовать следующую формулу для определения времени обработки детали.



$$T = \frac{L}{g_{отн} \eta}; \quad \eta = \frac{t_{0i}}{T_{ц}}, \quad (6)$$

где L – длина последовательно обрабатываемых, несовмещенных во времени элементарных участков ППД обрабатываемых в выбранной ТС; $g_{отн}$ – скорость относительных движений потока частиц и деталей; η – коэффициент непрерывности процесса; $T_{ц}$ – продолжительность цикла.

Из вышеизложенного следует, что выбор рациональной структуры операции ППД сложная многовариационная технико-экономическая задача, в основе которой лежит обоснование такого сочетания элементарных участков с методами ППД, при котором достигается наибольшая производительность операции, и при этом обеспечиваются требуемые показатели качества поверхности и эксплуатационные свойства детали.

Для того, чтобы технолог мог найти для конкретной детали возможно лучшее решение этой ответственной задачи, необходимо ответить на следующие вопросы:

- какие поверхности детали должны составлять основу элементарных участков ППД;
- в условиях использования, какого метода ППД возможна одноэлементарная обработка этих участков поверхности детали;
- при невозможности одноэлементарной обработки детали, как и каким методом ППД можно провести обработки этих участков при наилучших технико-экономических показателях.



1.5 Обоснование элементного участка ППД

Для построения рациональной структуры операции ППД, прежде всего, следует определить минимально необходимый один или несколько элементных участков ППД, которые должны быть обработаны на детали, чтобы после обработки деталь отвечала заданным конструкторской документацией требованиям по качеству и эксплуатационным свойствам. Затем на основе выбора метода принять такую, которая обеспечивала бы решение технологической задачи с наилучшими технико-экономическими показателями.

Определение элементных участков ППД начинают с анализа зон детали, для которых по ТУ предусмотрена обработка методами ППД с целью:

- обеспечения благоприятной по условиям эксплуатации минимальной шероховатости или заданного микрорельефа;
- обеспечения максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств;
- исправления погрешностей формы и обеспечения требуемой точности размеров детали.

Выявление таких зон и установление параметров качества поверхностного слоя, которые необходимо обеспечить обработкой методами ППД, осуществляется конструктором в процессе конструкторской подготовки производства.

Для решения этой задачи широко используют методы научного прогнозирования на основе усталостных испытаний или метод экспертных оценок.

Приведем последовательность действий конструктора по выявлению «слабых» в отношении долговечности мест детали, предопределяющих выбор обработки ППД методом экспертных оценок:

- анализ статических и динамических нагрузок, действующих на рассматриваемую деталь в рабочем и переходных режимах, выявление характера (силового, температурного и др.), величины нагрузки и площади воздействия, определение закона изменения и направления действия сил при эксплуатации изделия, выбор из числа действующих нагрузок главных, учитываемых при расчетах.

- исследование внутренних напряжений, возникающих в деталях под воздействием внешних нагрузок, инерционных и гра-



Технология машиностроения

витационных сил, и определение зон поверхности детали, где действуют растягивающие напряжения, особенно опасные с точки зрения усталостной прочности (рис.12).

- определение цикличности нагрузок за планируемый срок эксплуатации изделия. Средний возраст функциональной прогрессивности многих изделий может быть принят равным 10 годам.

- прогнозирование мест наиболее вероятного образования трещин усталости с учетом геометрии детали, величины и распределения внутренних напряжений, цикличности нагрузки, а также с учетом технологии изготовления детали.

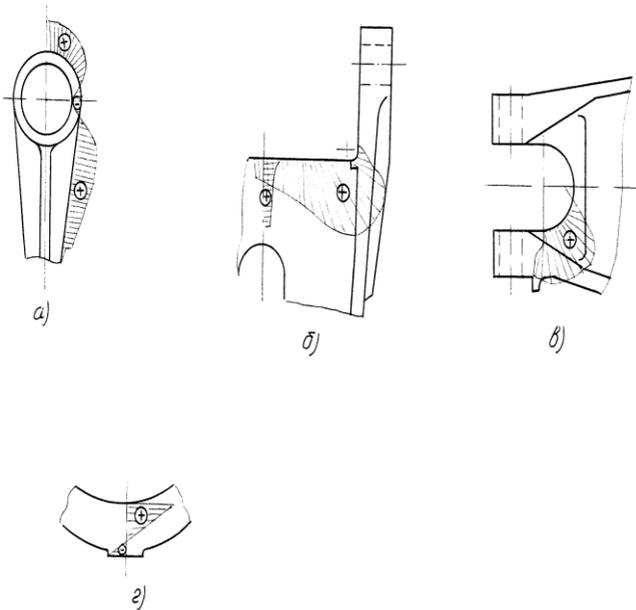


Рис.12. Эпюры напряжений в нижнем звене шлиц-шарнира
 а – по периметру большой проушины, б – в галтели большой проушины, в – по галтельному переходу между малыми проушинами, г – по поперечной оси большой проушины



- прогнозирование долговечности зон наиболее вероятного появления усталостного разрушения. При этом определяется средний ожидаемый ресурс при принятой для всех элементов детали постоянной доверительной вероятности разрушения $Q = 0.025$, что соответствует при нормальном распределении ресурса значению $Rp - 2\sigma$, где Rp – математическое ожидание ресурса; σ – его среднеквадратичное отклонение. Если принять допущение о равенстве средних квадратичных отклонений по всем элементам детали, то при этом условии расчеты зон упрочнения можно производить с использованием среднего ресурса Rp . После определения среднего ресурса по зонам детали находят значение разноресурсности Ω_R по законам концентрации

$$\Omega_{Ri} = \frac{Rp_i}{Rp_\sigma} \quad (7)$$

где Rp_i – средний ресурс i -й зоны концентрации напряжений из m зон детали;
 Rp_σ – средний базовый ресурс детали.

- Зоны детали, у которых $\Omega_{Ri} < 1$ свидетельствует о необходимости их обработки методами ППД.

При всём своем удобстве и простоте определения зон наиболее вероятного появления усталостного разрушения этот метод является весьма приближенным, т.к. усредняя ресурс по зонам детали, из поля зрения выпадают участки поверхности, которые могут значительно снижать ресурс детали; тем самым конструктор вынужден вводить коэффициенты запаса прочности, а, следовательно, повышенные требования к физико-механическим характеристикам поверхностного слоя. На менее напряженные участки поверхности будут назначены завышенные требования по упрочнению, что приведёт к увеличению себестоимости операции ППД и соответственно детали. И что не менее важное, технолог лишается возможности рационального построения структуры упрочнения этих зон.

Из методов научного прогнозирования наибольшее распространение получили методы проволоочной тензометрии и фотоупругости (поляризационно-оптический метод), применение



Технология машиностроения

которых в исследовании внутренних напряжений описано в работе [8] и в справочной литературе [9]. Эти методы обеспечивают достаточно высокую точность определения концентрации напряжений в образцах и натуральных деталях, (ошибка составляет не более 5%), по результатам которых затем рассчитывается эксплуатационный ресурс деталей. Однако, эти методы требуют больших затрат средств и времени, связанных с подготовкой к эксперименту, натурального моделирования эксплуатационных нагрузок и обработки результатов исследований.

С развитием средств автоматического проектирования всё большую популярность приобретают численные методы анализа напряжённо–деформированного состояния, наиболее перспективным из которых является **метод конечных элементов** [10]. Ключевая идея метода заключается в том, что при анализе сплошная среда моделируется разбиением на конечные области (элементы). Взаимодействие этих элементов (перемещения в указанной области материальной среды), при приложении рабочих нагрузок, описывается набором функций, совместное решение которых позволяет рассчитать величины напряжений в каждом конечном элементе.

Для описания плоского напряжённого состояния в качестве конечных элементов используются пластины треугольной и четырёхугольной формы (рис.13.а,б); для описания трёхмерного плоско–напряжённого состояния – объёмные трёхмерные элементы (рис.13. в,г,д).

Реализация этого метода для расчета напряжённого состояния детали в условиях её реальной эксплуатации наиболее объективно осуществляется с помощью модуля APM Structure3D системы APM WinMachine.

Модуль APM Structure3D позволяет осуществить комплексный анализ напряжённо – деформированного состояния объектов любой конфигурации и типоразмера при произвольном нагружении и закреплении. Чтобы произвести расчёт, необходимо предварительно создать виртуальную твёрдотельную модель исследуемой детали на основании её формы и размерного описания. В данном модуле это сделать крайне неудобно, а порой, особенно для деталей сложной конфигурации, даже невозможно, вследствие ограниченных в модуле функций трёхмерного моделирования.

Наиболее эффективно эта задача решается с помощью модуля параметрического твердотельного и поверхностного моделирования APM Studio системы APM WinMachine; возможно так-



Технология машиностроения

же построение и в другой CAD программе поддерживающей экспортирование файлов с расширением .step. Объект, созданный с применением функций трёхмерного моделирования (рис.14) разбивается на объёмные конечные элементы (рис.13.в,г,д) с заданным шагом по трём координатам (рис.15), используя встроенный в этот модуль генератор конечно-элементной сетки. Количество конечных элементов ограничивается точностью расчёта. Для деталей типа пластин разбиение рекомендуется производить на пластины треугольной и четырёхугольной формы заданной толщины (рис.13.а,б).

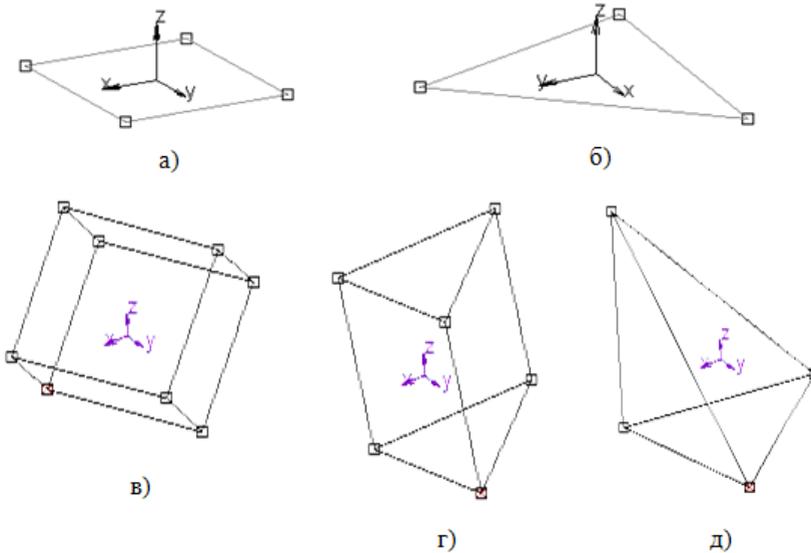


Рис.13. Типы пластинчатых (а, б) и объёмных (в, г, д) конечных элементов: а) четырёхугольная пластина, б) треугольная пластина, в) 8-узловой октаэдр; г) 6-узловая треугольная призма, д) 4-узловой тетраэдр

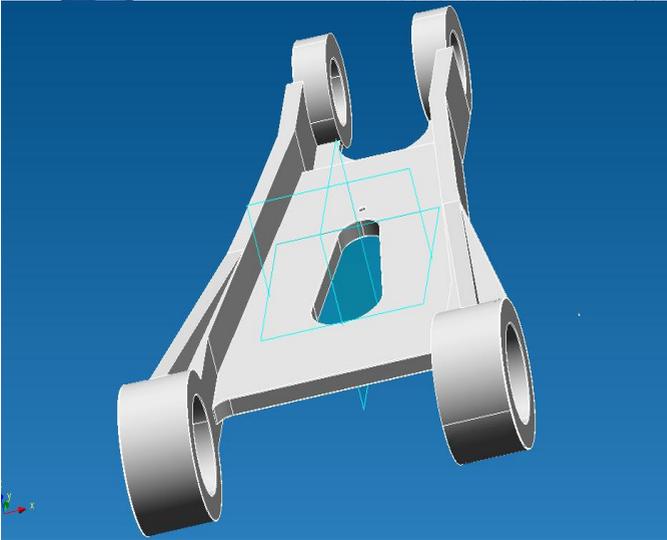


Рис.14. Твёрдотельная модель нижнего звена шлицевого шарнира основной стойки шасси транспортного самолёта, реализованная в модуле APM Studio

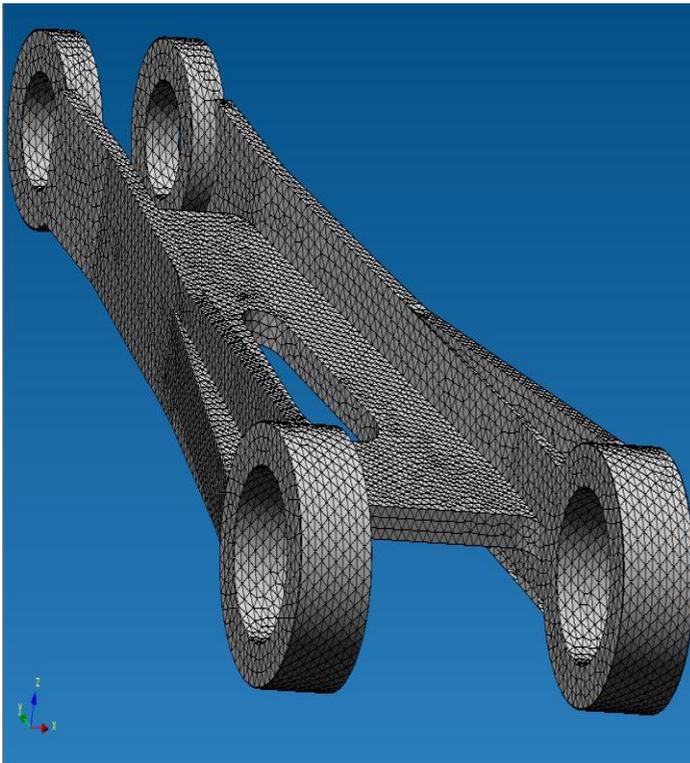


Рис.15. Генерация твёрдотельной модели конечно-элементной сеткой



Технология машиностроения

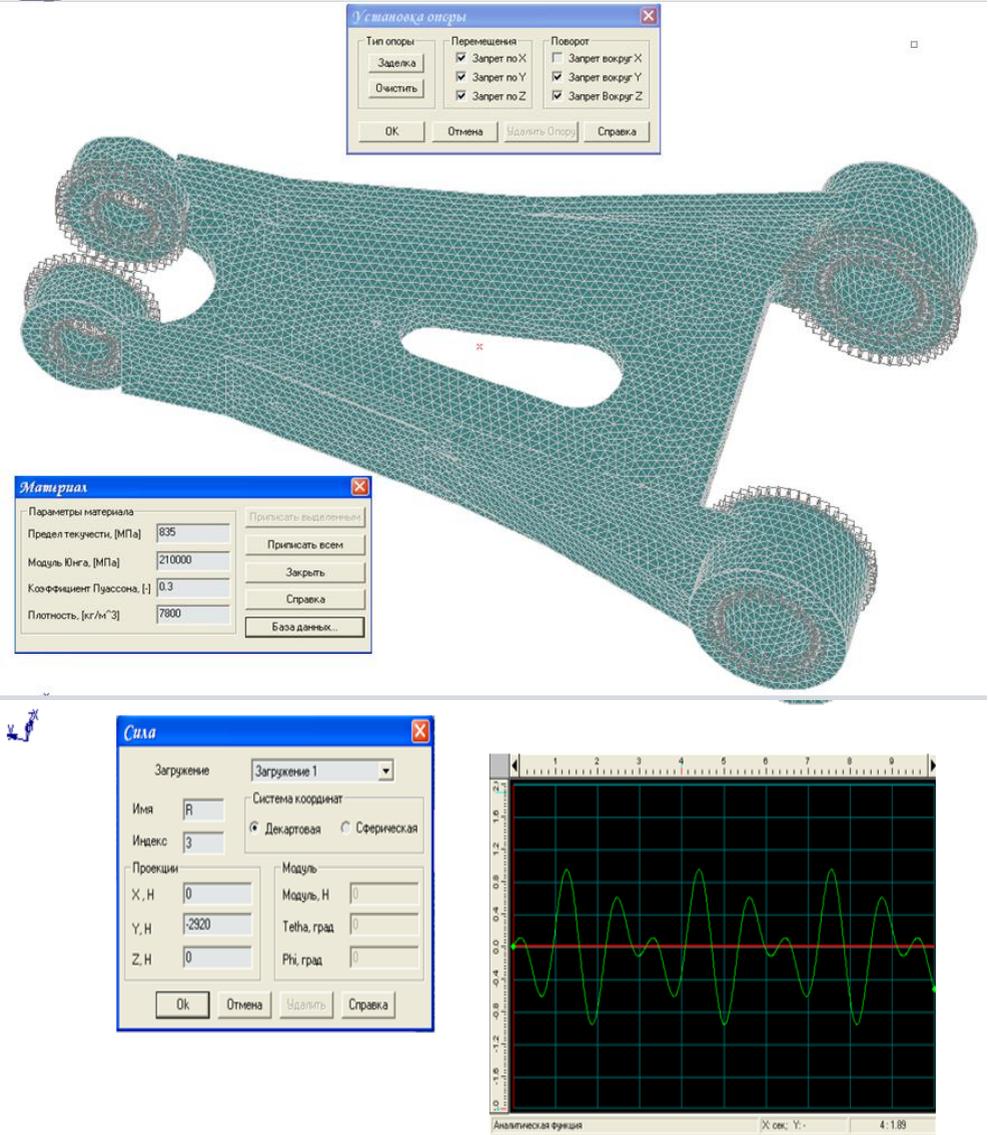


Рис.16. Моделирование рабочих условий звена шлиц-шарнира в модуле APM Structure3D



Технология машиностроения

тали импортируется в модуль APM Structure3D, где помимо её конструктивной формы и размерного описания задаётся материал с основными характеристиками (предел текучести, модуль упругости, коэффициент Пуассона), количество степеней свободы, величина, направление, точка приложения и закон распределения рабочих нагрузок.

Расчёт напряжённо – деформированного состояния в модуле APM Structure3D производится следующим образом:

1. При приложении статической и (или) динамической нагрузок (изменяющихся по определённому закону) к узлам элементов (рис.16) происходит взаимодействие конечных элементов по дифференциальным законам, причём описывающие эти законы уравнения различны для каждого из типов конечных элементов.

2. С учетом выбранного типа конечного элемента формируется матрица жёсткости, которая сводится к системам алгебраических уравнений. Эти уравнения дополняются законами, описывающими воздействие внешних сил и заданных ограничений (степеней свободы) на перемещения объекта.

3. Совместным решением полученных систем уравнений определяются величины перемещений (деформаций) и напряжений, которые будут иметь место в каждом из конечных элементов модели детали.

В результате выполняемых модулем APM Structure3D расчетов, выводимая на экран информация представляется в виде:

- карты распределения напряжений по объёму модели исходной и упрочнённой детали в виде изолиний цветовой гаммы, как в форме эквивалентных напряжений (рис.17), так и отдельных их компонентов;
- таблицы количественных значений напряжений во всех конечных элементах детали.

Эти результаты дают технологу не только наглядное представление наиболее опасных, с точки зрения усталостной прочности зон детали, но и могут быть положены в основу количественной оценки выбора участков поверхности детали, требующих упрочнения, которые предлагается определять с помощью коэффициента разноресурсности, показывающий на какую величину необходимо упрочнить тот или иной участок поверхности по сравнению с исходным или ожидаемым пределом усталости детали:



$$\Omega = \frac{\sigma_{\max}^i}{\sigma_{-1}^{ucx} \cdot K_{F\sigma}} \quad (8)$$

где σ_{\max}^i – максимальные напряжения, действующие в сечении i -ых конечных элементах, МПа;

σ_{-1}^{ucx} – исходный предел усталости натурной детали, МПа;

$K_{F\sigma}$ – коэффициент, учитывающий шероховатость участков поверхности детали, определяемый по нижеприведённой зависимости:

$$K_{F\sigma} = 1 - 0.22 \lg R_z (\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1) - \text{при } R_z > 1 \text{ мкм} \quad (9)$$

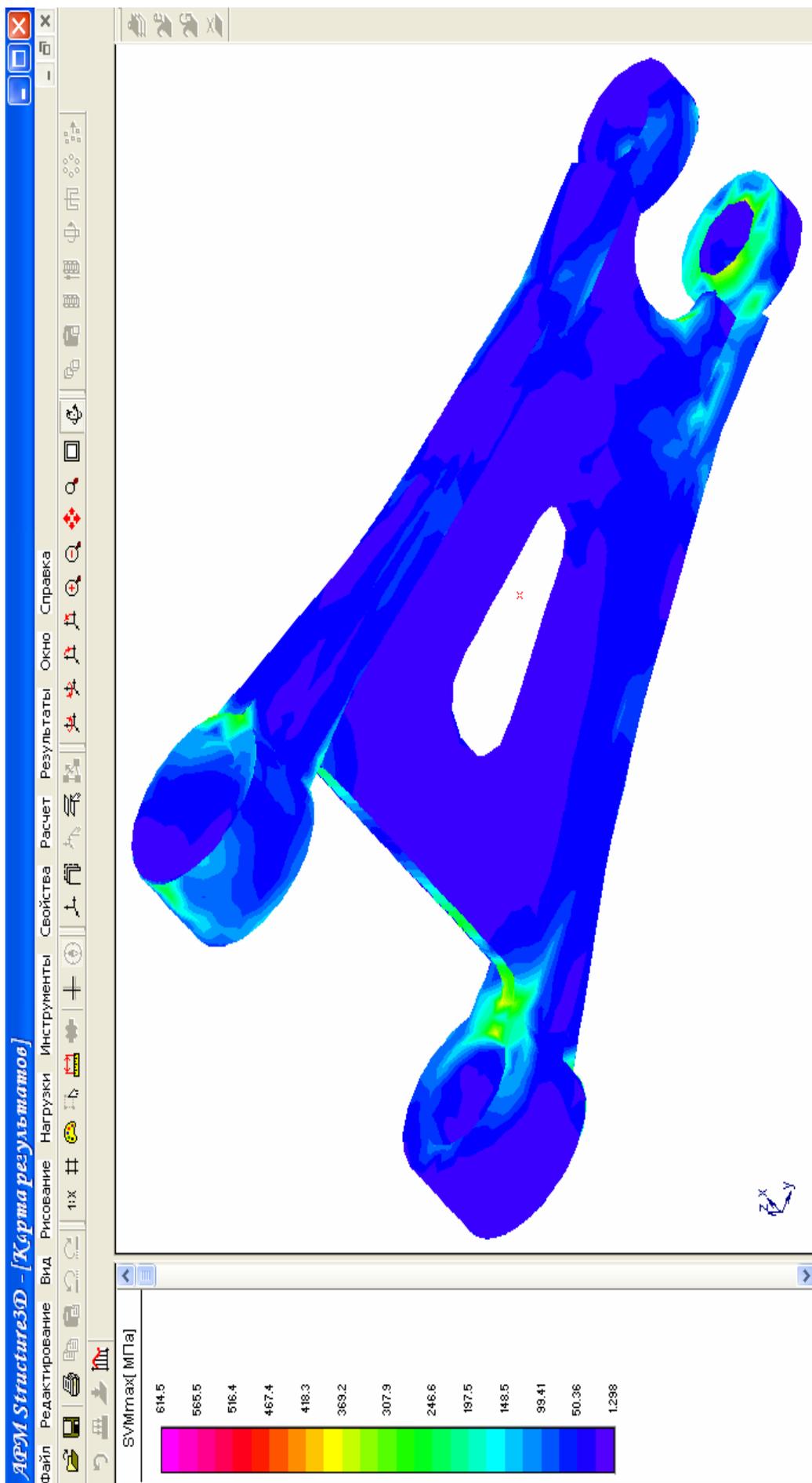


Рис.17. Карта распределения эквивалентных напряжений по объёму модели нижнего звена шлиц-шарнира в виде изолиний цветовой гаммы по результатам расчёта в ARM Structure3D



Технология машиностроения

$$K_{F\sigma} = 1 - \text{при } R_z \leq 1 \text{ мкм} \quad , \quad (10)$$

где, R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм, σ_B – предел прочности детали, МПа.

Совокупность конечных элементов, у которых значение разноресурсности больше единицы $\Omega > 1$ представляют собой участки поверхности детали, требующих упрочнения ППД.

Предложенный для количественной оценки коэффициент разноресурсности учитывает влияние масштабного фактора, концентраций напряжений, вызванных резким изменением очертания детали и качества обработки поверхности, что как будет показано в следующей главе, являются основными факторами, влияющие на усталостную прочность натуральных деталей.

Алгоритм описанной выше методики выявления участков поверхности детали, требующих упрочнения представим в виде блок–схемы (рис.18). В качестве исходных данных вводятся:

- конструктивное описание детали (геометрическая форма и её размерное описание), материал, её положение в машине или сборочной единице;
- условия эксплуатации: точка приложения, направление, величина, характер и площадь воздействия внешних нагрузок и напряжений, закон их распределения.

Предложенный метод моделирования напряжённого состояния деталей в условиях их реальной эксплуатации позволяет наиболее объективно выявить и обосновать участки поверхности детали, требующие упрочняющей обработки ППД с целью снижения величины их разноресурсности без проведения дорогих натуральных исследований, требующие привлечения различных высококвалифицированных специалистов, спецоборудования, помещений и т.д. Кроме того, применение этого метода в инженерной практике не требует у технолога специальных знаний по оценке напряжённого состояния деталей, что позволит значительно сократить сроки технологической подготовки производства при разработке технологии упрочняющей обработки детали.

Анализ наиболее слабых с позиций эксплуатации зон позволяет конструктору определить участки поверхности детали, которые при изготовлении должны включать обработку методами ППД, и сформулировать требования к ним.

В состав требований к поверхностям, обрабатываемых методами ППД, включаются:

- требования, регламентирующие геометрические па-



Технология машиностроения

параметры поверхности (вид рельефа, направленность и величина шероховатости поверхности);

- требования, регламентирующие параметры материала поверхностного слоя (структура, поверхностная твердость, глубина упрочнения, величина, и глубина контактных сжимающих напряжений);

- требования, регламентирующие загрязненность поверхности после обработки методами ППД;

- требования, регламентирующие допустимые виды, размеры дефектов поверхности.



Рис.18. Алгоритм выбора поверхностей, подлежащих упрочняющей обработке ППД



Технология машиностроения

Исходя из этих требований, технологом определяется технологическое назначение операции ППД, обосновываются отдельные элементные участки ППД, методы ППД и формируется структура операции ППД.

Рассмотрим процесс обоснования структуры операции упрочняющей обработки на примере детали представленной на рис.19. Требованиями конструкторской документации предусмотрена упрочняющая обработка наиболее слабых в отношении долговечности (рис.19) мест галтелей большой проушины и галтельного перехода, при этом конкретных количественных показателей качества поверхностного слоя (таких как, степень и глубина упрочнения) не устанавливается.

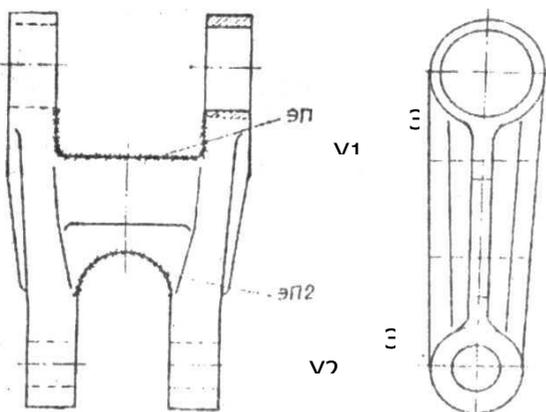


Рис.19.
Иллюстрация
элементных
участков ППД
нижнего звена
шлицевого
шарнира

Ситуация, когда в конструкторской документации нет уточнения этих показателей, встречается очень часто. Вызвано это двумя причинами: во-первых, трудностями их непосредственного контроля на детали в процессе её изготовления, а во-вторых, несущественным влиянием характеристик наклепанного слоя на макродеформацию детали.

Если на основе предварительного анализа установлено, что процесс упрочнения приводит к существенным изменениям формы (например, при одностороннем упрочнении плоской равножесткой детали), то предельно допустимые макроискажения детали должны быть оговорены в ТУ.

Таким образом, технологическое назначение операции ППД детали, представленной на рис.19 – повышение усталостной прочности. Из этого следует, что в ходе операции главная задача заключается в формировании наклепанного слоя на поверхностях



Технология машиностроения

детали, охватывающих зоны наиболее вероятного её разрушения в процессе эксплуатации.

Предусмотренные ТУ требования позволяют выделить для достижения вышеуказанной цели два элементных участка ППД на детали ЭУ1 и ЭУ2 (рис.14). Анализ формы, геометрических размеров и расположения этих участков свидетельствует о том, что они находятся на некотором расстоянии от наружных поверхностей и имеют сферическую форму. Это предопределяет соответствующий выбор деформирующих инденторов и метод ППД. Кроме того, разомкнутое положение их по отношению друг к другу показывает, что объединить их в единый элементный участок ППД можно или путем включения в процесс ППД поверхностей осуществляющих их конструктивную взаимосвязь или путем применения многоинструментальной наладки, осуществляющей одновременное их упрочнение с одной установки.

Учитывая, что деталь имеет достаточную жесткость и небольшие габаритные размеры, её упрочнение в соответствии с выше приведенной в таблице 1 классификацией можно осуществить как по первой схеме, так и по второй и третьей схемах (рис.20).

Первая схема (рис.20а.) позволяет рассматривать одноэлементное упрочнение детали виброударным или ударно-барабанным методами ППД. При этом не требуется установка деталей, т.к. они загружаются в емкость для обработки свободно и совершают движение совместно с обрабатывающей средой. В результате взаимного соударения деформирующих инденторов обрабатывающей среды с поверхностью детали происходит ППД и её упрочнение. В процессе обработки этими методами ППД упрочнению подвергаются все доступные для воздействия деформирующих тел обрабатывающей среды поверхности, в том числе и ЭУ1 и ЭУ2, представляющие собой в совокупности единый элементный участок ППД.

По количеству одновременно обрабатываемых деталей данная структура организации операции ППД относится к классу $D_n - I_1$ (многодетальная – одноинструментальная). Основное время обработки оценивается:

$$t_0 = \frac{t_M}{n}, \tag{11}$$

где t_M – продолжительность обработки выбранным методом ППД ($t_{Mв}$ – виброударным, $t_{Mуб}$ – ударно – барабанным).



Технология машиностроения

Применение этой схемы возможно только в том случае, если нет ограничений по качеству других поверхностей, автоматически включенных в процесс упрочняющей обработки. Этот фактор особенно важно учитывать при использовании ударно-барabanного метода, так как повреждение поверхностей может наступать в результате соударения деталей, масса которых значительно превышает массу деформирующих инденторов обрабатываемой среды. Несмотря на простую реализацию этих методов для решения задачи поставленной в нашем случае, а именно повышение усталостной прочности за счет обеспечения как можно большей глубины наклепа на поверхностях ЭУ1 и ЭУ2, эти методы обладают невысокими энергетическими возможностями ($V=1-2$ м/с) и большой продолжительностью обработки вообще. Повышение производительности упрочнения этими методами за счет увеличения энергетических параметров обработки приводит к увеличению энергоемкости и материалоемкости устройств, реализующих тот или иной метод ППД. Ограниченность доступа к поверхностям ЭУ1 и ЭУ2 приводит к дополнительному снижению эффекта упрочнения.

Для реализации второй схемы упрочнения (Рис.20.б,в.) могут быть использованы динамические методы ППД направленным потоком обрабатываемой среды (дробеструйная обработка) или порционными массами (дробеметная, ударно-импульсная обработка). Эти методы обладают высокими энергетическими возможностями и позволяют получить высокий эффект при упрочнении поверхностей по сравнению с рассмотренными выше методами. Вместе с тем, устройства, реализующие эти методы, энергоемки и материалоемки. Вторая схема предусматривает четкую ориентацию детали относительно обрабатываемой среды, а значит наличие приспособлений – для установки и закрепления детали. Применение этих методов для упрочнения рассматриваемой детали, также как и в предыдущем случае, может быть ограничено из-за включения в процесс обработки дополнительных поверхностей, попадающих в зону действия обрабатываемой среды, упрочнение которых по ТУ не предусмотрено.

Кроме того, ограниченность доступа обрабатываемой среды к поверхностям ЭУ1 и ЭУ2 не позволяет в полной мере использовать энергетические возможности этих методов.

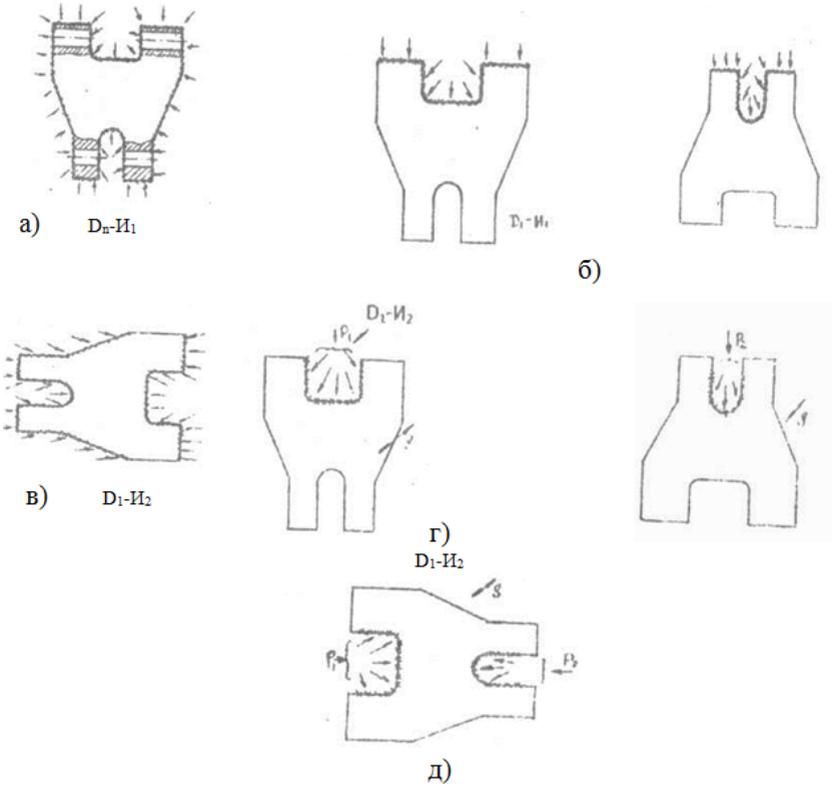


Рис.20. Варианты схем упрочняющей обработки нижнего звена шлицевого шарнира методами ППД

Также операции упрочнения этими методами уступают по производительности виброударному и ударно – барабанному методам, так как структурно строятся по типу $D_1 - II_1$ (однодетальная – одноинструментальная) или $D_n - II_1$, но при этом захватываемое при упрочняющей обработке количество деталей ограничивается зоной эффективного действия обрабатывающей среды. Кроме того, структура операции должна предусматривать переустановку детали, что приводит к увеличению $t_0 = 2t_{э1}$.

Повысить производительность операции ППД по этой схеме можно двумя путями:

- путем организации поточной обработки деталей;
- построением структуры операции по типу



$D_1 - I_2$ (однодетальная – двухпоточная) (рис.20.в).

В основном применяется первый путь, т.к. второй очень сложно реализовать.

Наличие в ТУ на деталь вышеотмеченных ограничений позволяет рассмотреть для упрочняющей обработки детали третью схему (рис.20.г), используя для решения поставленной задачи или метод накатывания или метод упрочнения набором энергонесущих инденторов.

Эта схема проста в исполнении, легко может быть встроена в цикл механической обработки, на основе использования универсального оборудования. Наличие разных по форме и размерам элементарных участков ППД, а также разомкнутость их положения предопределяют структуру организации операции ППД по типу $D_1 - I_2$ (однодетальная – двуинструментальная), которая может быть осуществлена или последовательно (рис.20.г) или параллельно (рис.20.д). При этом $t_0 = t_{э1} + t_{э2}$ или $t_0 = t_{э1}, t_0 = t_{э2}$.

Для создания высоких энергетических усилий с целью обеспечения наибольшего эффекта упрочнения необходимо применить жесткие и прочные средства технологического оснащения ОУ, а для повышения производительности требуется поточная организация упрочняющей обработки детали. В качестве ограничения применения этой схемы могут выступать прочностные характеристики деталей. Для окончательного принятия решения по методу ППД и структуре операции данной детали необходимо провести ряд экономических расчетов и обоснований, положив в основу проверку

- выполнения условия:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_{0э.у.i} = T_{ц}, \quad (12)$$

- оценку величины приведенной стоимости упрочняющей обработки методами ППД:

$$C_{np} = \sum_{i=1}^n C_{mexi} + E_n K_i, \quad (13)$$

где C_{mexi} – технологическая себестоимость обработки i -го элементарного участка упрочнения ППД; $E_n = 0.15 \div 0.2$ –



эффективность дополнительных капитальных вложений; n – количество элементарных участков упрочнения ППД; k – капитальные вложения в основные и оборотные средства.

Вышеприведенные рассуждения и технико-экономические расчеты позволили рекомендовать в качестве предпочтительной структуры ППД – структуру ОУ, основанную на первой схеме упрочнения, представленной на (рис.20.а) и реализуемой с помощью виброударного метода ППД (так как отсутствуют повышенные ограничения к качеству поверхностей, не входящих в состав элементарных участков упрочнения).

В заключение можно сформулировать, следующие рекомендации по обоснованию элементарного участка и выбору метода ППД:

1. По возможности необходимо выбирать метод ППД, обеспечивающий одноэлементную обработку детали по схеме 1 или 2, как наиболее производительную.

2. При наличии ограничений к качеству поверхностей, не входящих в комплект элементарных участков ППД, необходимо выбирать схемы и методы ППД, которые обеспечивают обработку детали, не затрагивая их.

3. Если деталь имеет большие габаритные размеры операции ППД технико-экономически выгоднее строить по схеме 4 или 5, выбирая для этого соответствующие методы ППД.

4. Не следует без предварительных обоснований расширять элементарные участки ППД больше, чем это предусмотрено требованиями конструкторской документации с целью избежания нежелательных эффектов вызываемых ППД (макродеформации, повреждение и ухудшение качества поверхности).

5. При небольших размерах элементарных участков упрочнения предпочтение следует отдавать методам, обеспечивающим местное ППД.

6. Выбор возможных методов ППД элементарных участков упрочнения желательно осуществлять с помощью информационно-поисковой модели [1], отражающей для конкретной детали взаимосвязь обработки отдельно выделенных элементарных участков в структуре операции ППД (рис.21). Она позволяет определить возможные пути совместной ППД элементарных участков при обработке конкретной детали. Для выявления рациональной структуры операции ППД информационная модель дает возможность обосновать инструментальную наладку при квазистатических методах ППД



или параметры потока обрабатывающей среды при упрочняющей обработке динамическими методами ППД.

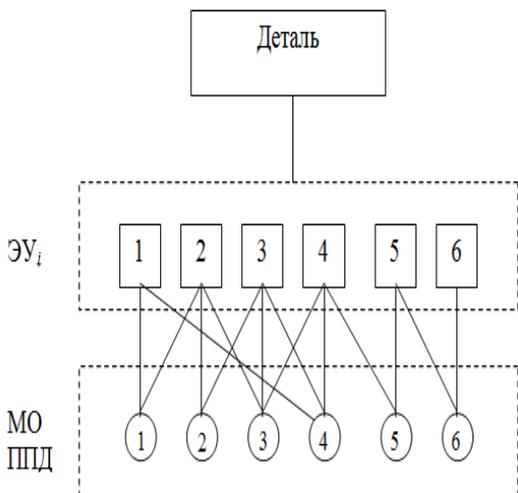


Рис.21. Информационно-поисковая модель взаимосвязи элементарных участков с методами ППД

1.6 Типизация технологических операций ППД

Обработке методами ППД могут подвергаться детали разнообразных форм и размеров, изготовленные из различных материалов (рис.22). В зависимости от характера и условий эксплуатации детали условно можно разделить на три группы [2]. Первую группу составляют детали, работающие при длительных статических или повторно-статических нагрузениях (балки, болты, оси...). Отказы деталей этой группы связаны с перенаклепом или пластической деформацией, коррозией или разрушением. Во вторую группу входят детали, работающие при динамических циклических нагрузках (зубчатые колеса, рычаги, оси, коленчатые валы, болты). Их повреждения обусловлены, главным образом, усталостными разрушениями. Третью группу составляют детали, работающие в условиях изнашивания при сравнительно небольших нагрузках (цилиндры, плунжеры, диски), отказы, в работе которых вызваны, трещинами, коррозией, повышенным износом.

Однако, несмотря на различие конструктивных особенностей деталей, обобщающим фактором является то, что разрушение детали при любых условиях эксплуатации начинается с поверхности, которая содержит целую совокупность концентраторов напряжений. Концентраторы напряжений на поверхности являют-



Технология машиностроения

ся следствием, в первую очередь, конструкции детали, а во вторую – предшествующей механической или термической обработки, или обработки ППД.

Поверхность любой детали представляет собой сочетания элементарных типовых поверхностей. В процессе эксплуатации детали, как правило, интенсивному нагружению и, как следствие, износу или разрушению, подвергаются не все поверхности, а лишь отдельные или определенная группа поверхностей. Задача заключается в том, чтобы выявить эти поверхности, подвергнуть их в ходе изготовления обработке ППД и, таким образом, обеспечить повышение ресурса детали. Такие поверхности в операциях ППД представляют собой элементные участки ППД.

Форма, размеры и расположение элементных участков в целом влияет на выбор методов и структуру операции ППД. Поэтому они могут быть использованы в качестве основных признаков систематизации методов ППД, проектирования типовых и групповых операций ППД.

Типовые элементные участки, выбираемые для упрочнения методами ППД с целью повышения эксплуатационных свойств деталей (рис.23) по признаку общности характеристик геометрической формы могут быть разделены на пять групп: сложные, представляющие пространственную совокупность поверхностей; поверхности перехода от одной элементарной поверхности к другой; плоские поверхности; отверстия; поверхности, образованные вращением образующей вокруг оси. Они подразделяются на основе дополнительных признаков, определяющих их технологическую сложность. Такими признаками являются наличие или отсутствие дополнительных выступающих элементов, их форма и размеры, макроотклонения поверхностей, дополнительные уточнения формы поверхностей.

На основе дополнительных признаков в первой группе выделено семь типовых элементных участков ППД, во второй – пять, в третьей и пятой – три, в четвертой – пять.

Размеры элементных участков ППД, определяемые геометрическими характеристиками детали, а также их расположение на детали, влияют как на структуру операции ППД, так и на конструктивные параметры устройств, реализующих метод ППД и других средств технологического оснащения операций. В связи с этим размерные виды типовых элементных участков ППД формируются в увязке с габаритными размерами детали – шириной (диаметром) и максимальной длиной.

Представленная на рис.23 классификация типовых



Технология машиностроения

элементных участков ППД является исходной предпосылкой построения типовых и групповых операций ППД. В соответствии с признаками типизации ТП, в основу проектирования типовой операции закладывают возможность закрепления за данной ТС типового или группы типовых элементных участков ППД, близких по конструктивным признакам, т.е. форме, типоразмерам и техническими требованиями.

Рассматривая с этих позиций всю совокупность методов ППД, можно отметить, что для типовых операций ППД наиболее приемлемы квазистатические методы ППД, а также некоторые динамические методы ППД, в основе которых лежит кинематическая схема формирования типового элементного участка ППД.

Что же касается динамических методов ППД и методов ППД высокоэнергетическими полями, осуществляющих обработку деталей в результате многократного ударно – импульсного воздействия на них частиц обрабатывающей среды, находящихся в ней в различных кинетических состояниях, то они носят более универсальный характер и могут быть применены для формирования типовых элементных участков ППД различной конфигурации. Поэтому на базе этих методов строятся групповые операции ППД.

Групповой операцией ППД называется общая для группы различных по конструктивным признакам элементных участков ППД операция, выполняемая с определенной групповой оснасткой, обеспечивающая обработку детали на данном оборудовании, реализующем тот или иной метод ППД.

Из этого понятия вытекает, что основной технологической единицей групповой операции является также группа типовых элементных участков ППД. Однако, если при типизации операций ППД в общую группу объединены элементные участки ППД по принципу общей конфигурации, то при групповой обработке под группой понимается совокупность типовых элементных участков ППД различной конфигурации, характеризуемая общностью ТС.

Таким образом, при групповой обработке формируются группы типовых элементных участков ППД по методам ППД.

Основополагающими признаками при формировании группы для обработки в условиях конкретной групповой операции ППД являются:

- геометрическая форма, размеры и взаимное расположение на детали элементных участков ППД;
- геометрическая форма и размеры обрабатываемой



Технология машиностроения

детали, обеспечивающая возможность обработать их на одном и том же оборудовании;

- параметры качества обрабатываемых поверхностей (шероховатость, глубина наклепа), которые возможно обеспечить данными методами ППД;

- однородность заготовки, материала, исходного состояния поверхности, позволяющие обработать одинаковыми методами, инструментом или обрабатывающей средой;

- серийность выпуска деталей и трудоемкость их обработки.

Объектами типизации операций ППД могут также являться: порядок переходов при выполнении операции; применяемые инструментальные наладки; схемы закрепления детали; тип обрабатывающего инструмента или тип и состояние обрабатывающей среды; режимы и условия обработки методами ППД.

Переходы, применяемые при выполнении операций ППД, делят на два вида: технологический и вспомогательный. Технологический переход осуществляет заданный процесс ППД элементного участка ППД детали и характеризуется постоянством используемого инструмента или обрабатывающей среды; его основу составляет рабочий ход, определяющий параметры однократного перемещения инструмента или обрабатывающей среды относительно обрабатываемой детали или продолжительность воздействия обрабатывающей среды на поверхность относительно неподвижной детали.

Вспомогательный переход характеризуется содержанием действий СТО и оператора, обеспечивающих подготовку следующего за ним технологического перехода. Основу вспомогательного перехода составляет вспомогательный ход. Он определяется условиями однократного перемещения инструмента или обрабатывающей среды для упрочнения следующего элементного участка упрочнения. К вспомогательным переходам относится также установка детали (или деталей) и смена инструментальной наладки. Содержание и порядок выполнения переходов, определяющих структуру операции, зависит от расположения типовых элементных участков ППД и схемы обработки, присущей выбранному для построения типовой или групповой операции методу ППД.

Представленные в таблице 2 схемы обработки



Технология машиностроения

методами ППД, позволяют выделить три типовых технологических цикла на основе которых, структурно строятся операции ППД:

- **простой** технологический цикл (ПТЦ) – при котором формирование элементарных участков ППД осуществляется одним инструментом или в условиях воздействия однородной по составу обрабатываемой среды за один технологический переход;
- **групповой** технологический цикл (ГТЦ), при котором формирование элементарных участков осуществляется одним инструментом или одной обрабатываемой средой за несколько технологических переходов в рамках одной ТС;
- **комбинированный** технологический цикл (КТЦ), при котором формирование элементарных участков осуществляется разными инструментами или обрабатываемыми средами за один или несколько технологических переходов в рамках одной ТС.

На формирование рациональной структуры операции ППД существенно влияет способ установки деталей в процессе обработки. Практически все операции ППД осуществляют обработку детали путем соответствующей её ориентации и закрепления относительно инструмента или обрабатываемой среды. С этой целью, в зависимости от конфигурации детали, формы и расположения элементарного участка ППД, применяются необходимые универсальные или специализированные приспособления. Из всего арсенала методов ППД только два метода, такие как виброударный и ударно-барабанный (галтовка), позволяют осуществлять ППД без закрепления детали. Операции ППД, построенные по такой схеме обработки, обладают высокой производительностью и позволяют решить широкий диапазон задач по обработке деталей. В качестве ограничения обработки деталей по этой схеме выступают вес детали (до 2 кг) и её габаритные размеры.

В таблице 3 и 4 приведены типовые и групповые операции упрочняющей обработки элементарных участков ППД методами ППД.

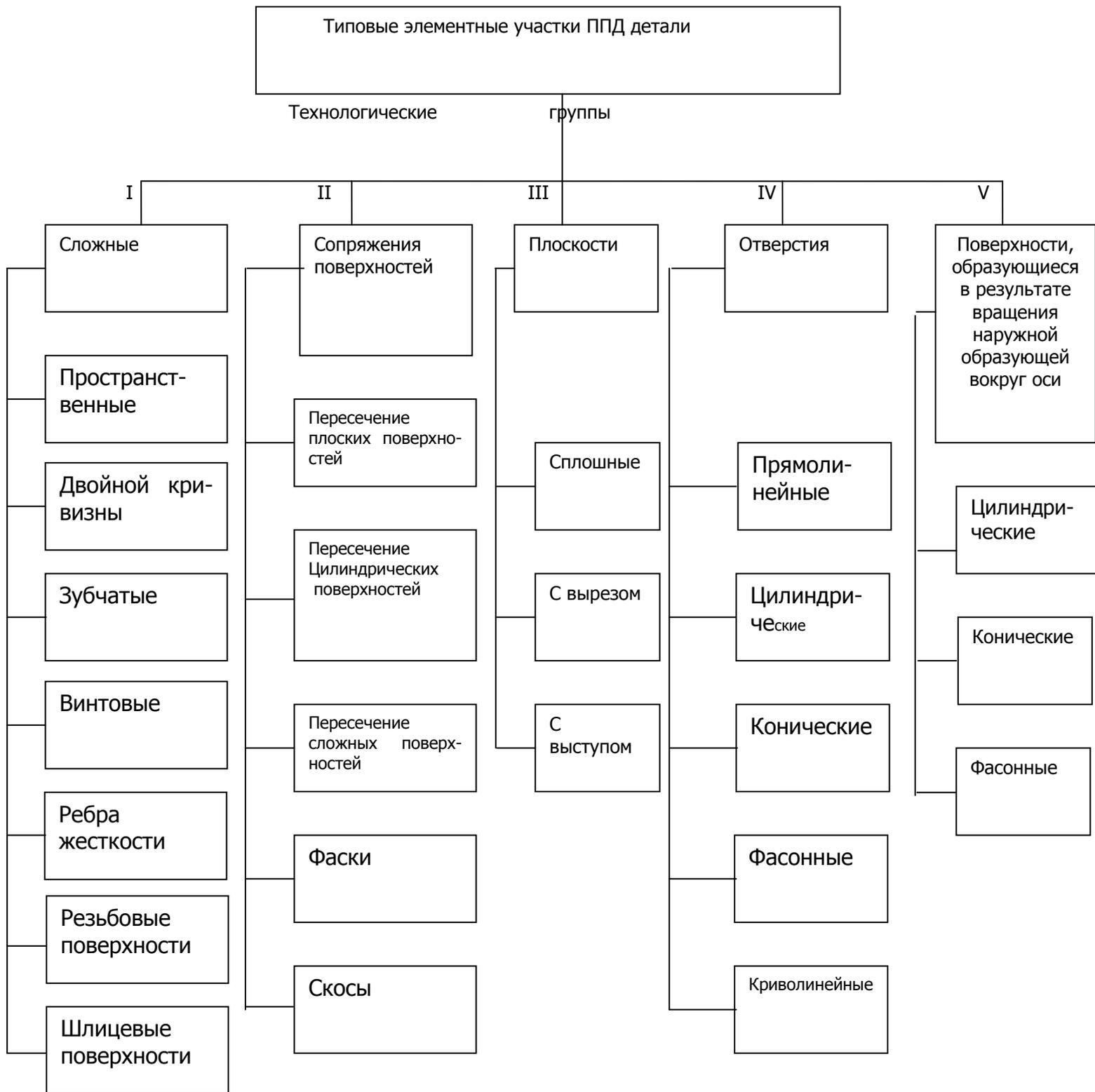


Рис.23. Классификация поверхностей, обрабатываемых методами ППД



Т а б л и ц а 3 - Типовые операции упрочняющей обработки методами ППД

Типовой элементный участок ППД	элементарный участок	Технологическое назначение операции	Метод ППД, инструмент, оборудование	Схема ППД	Тип технологического цикла	Технологические возможности и предпочтительная область применения
1	2	3	3	4	5	6
Плоскость, поверхности малой кривизны	Улучшение микрорельефа	Обработка механическими щетками. Цилиндрические или торцевые щетки. Оборудование универсальное		П ТЦ, ГТЦ	Большие по площади гладкие плоские или небольшой кривизны поверхности	
	Улучшение микрорельефа по величине износостойкости	Накатывание. Торцевой или роликовый накатник. Оборудование универсальное.		П ТЦ, ГТЦ	Большие по площади гладкие открытые поверхности	

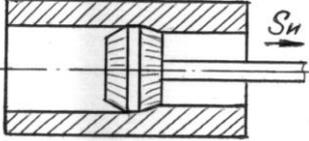
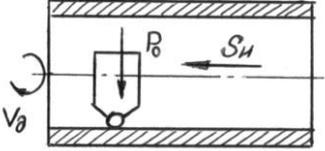


Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
	Повышение усталостной прочности	Ударно-импульсная обработка. Дробь – круглые тела, из различных материалов. Специальное оборудование.		ПТЦ	Вр.т.=10-15 м/с др.т.=1-6 мм Круглые габаритные длинномерные детали (5м и более) или имеющих большой радиус кривизны.
	Повышение износостойкости и усталостной прочности	Пневмодинамическая обработка. Дробь – круглые тела из различных материалов d=1-3 мм. Специальное оборудование.		ПТЦ	Вр.т.=4-8 м/с др.т.=1-3 мм Длинномерные плоские детали.



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
<p>Отверстия цилиндрические; поверхности галтельных переходов внутренних цилиндрических поверхностей и торцевых.</p> <p>Поверхности сплошных внутренних канавок</p>	<p>Сглаживание микрошероховатостей исправление формы, повышение износостойкости и контактной выносливости</p>	<p>Дорнование.</p> <p>Инструмент – дорн с цилиндрической ленточкой.</p> <p>Протяжное или прессовое оборудование</p>		<p>ПТЦ</p>	<p>Детали типа втулок, труб малого и среднего размера.</p> <p>Натяг 0,03-0,15 мм.</p>
	<p>Уменьшение шероховатости.</p> <p>Повышение износостойкости.</p>	<p>Выглаживание.</p> <p>Инструмент – выглаживатель с алмазным наконечником сферической формы с R 0,5-3,5мм.</p> <p>Универсальное оборудование.</p>		<p>ПТЦ</p>	<p>Тонкостенные и неравножесткие детали.</p> <p>$P_0=150-250Н$</p> <p>$S_H=0,02-0,1$ мм/об</p> <p>Натяг 3-7 мкм</p>



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
		<p>Пневмодинамическая обработка. Дробь-тела круглой формы. Специальные устройства разгонного типа.</p>		<p>ПТЦ</p>	<p>Отверстия цилиндрические большой длины Vр.т.=12-15 м/с др.т.=1-3 мм</p>
<p>Отверстия профильные.</p>	<p>Повышение износостойкости, контактной и усталостной прочности.</p>	<p>Дорнование. Профильный дорн. Протяжное или пресовое оборудование.</p>		<p>ПТЦ</p>	<p>Натяг 0,02-0,3 мм. Исправление формы после термообработки.</p>



Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
		<p>Обработка механическими щетками. Цилиндрические щетки. Универсальное оборудование.</p>		<p>ПТЦ</p>	<p>Обработка мало жестких деталей. Проволока $d=0,1-1$ мм. $d_H=100-500$ мм. $V_n=20-60$ м/с</p>
	<p>Повышение усталостной прочности.</p>	<p>Центробежная обработка. Ротационная головка с шариками или роликами. Универсальное оборудование.</p>		<p>ПТЦ, ГТЦ</p>	<p>Обработка жестких деталей. $V_n=8-40$ м/с $V_d=30-90$ м/с Натяг 0,05-0,5 мм $S_n=0,02-0,2$ мм/об $d_{p.t.}=5-16$ мм</p>

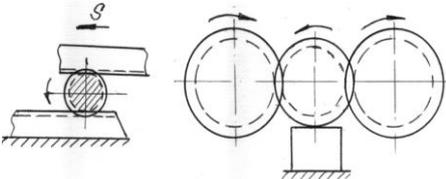
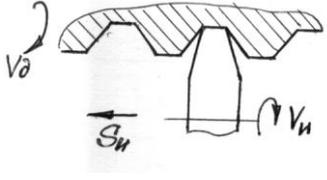
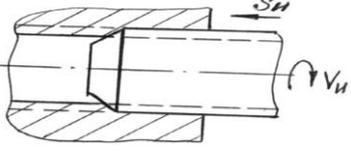
Продолжение таблицы 3



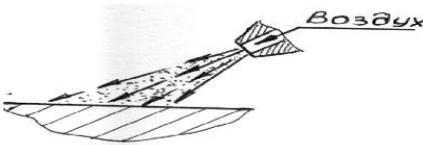
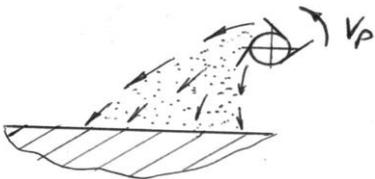
1	2	3	4		6
		<p>Обработка единичным или набором инденторов. (чеканка). Инструмент – специальные бойки, ролики, шарики. Специальные чеканочные приспособления, устанавливаемые на универсальном оборудовании.</p>			<p>Частота ударов механич. – 10-50 Гц. Ультразвук. – 18-24 кГц. Обработка жестких деталей. Галтели разной кривизны. Поверхности сложной формы (шлицы, зубчатые колеса)</p>
<p>Поверхности сопряжения пересекающихся плоскостей и поверхностей малой кривизны.</p>	<p>Повышение усталостной прочности.</p>	<p>Обработка единичным или набором инденторов. Инструмент – специальные бойки, ролики, шарики. Шарикостержневые упрочнители; Пневмомолотки; Специальные чеканочные приспособления.</p>		<p>ГТЦ</p>	<p>Частота ударов 10-50 Гц. Энергия удара 6-16 Дж. Упрочнение сварных швов, впадин, шлицов, колес, галтелей.</p>



Продолжение таблицы 3

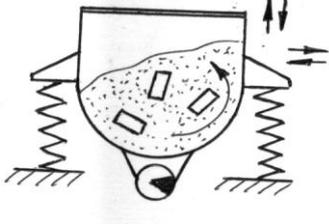
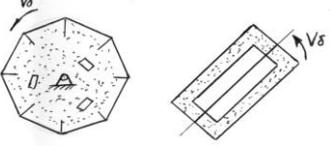
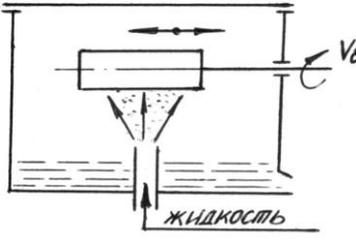
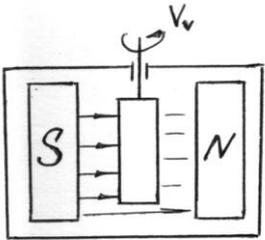
1	2	3	4	5	6
Наружные резьбовые, шлицевые поверхности, зубья зубчатых колес	Формообразование резьбы. Повышение износостойкости и усталостной прочности.	Накатывание. Резьбовые плашки или ролики. Специальное оборудование.		ТЦ	Мелкие резьбы, мелкозубчатые шлицы и зубчатые колеса.
		Обкатывание. Профильные ролики с углом профиля резьбы на 10-20° меньше угла профиля резьбы. Специальное и универсальное оборудование.		ТЦ	Резьбы, шлицы, зубчатые колеса, различной формы и типоразмеров.
Внутренние резьбовые поверхности.	Формообразование с упрочнением.	Выдавливание. (раскатывание) Самонакатывающиеся винты, метчики раскатники.		ТЦ	Резьбы малого диаметра.

Т а б л и ц а 4 - Групповые операции упрочняющей обработки методами ППД

Метод ППД	Инструмент, оборудование	Схема ППД	Элементные участки ППД	Тип технологического цикла	Технологическое назначение и возможности
1	2	3	4	5	6
Пневмодробеструйная обработка	Дробь – тела круглой формы из различных материалов. Специальное оборудование.		Поверхности различной конфигурации и типоразмеров.	ПТЦ, ГТЦ.	Повышение усталостной прочности. $V_{p.t.} = 3-5$ м/с $d_{p.t.} = 0,5-2$ мм.
Дробеметная обработка	Дробь – тела различной формы из различных материалов. Специальное оборудование.		Поверхности различной конфигурации и типоразмеров.	ПТЦ, ГТЦ.	Повышение усталостной прочности. $V_{p.t.} = 50-80$ м/с $d_{p.t.} = 0,5-10$ мм.



Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6
<p>Вибрационная ударная обработка</p>	<p>Дробь – круглые тела из различных материалов. Специальное оборудование.</p>		<p>Поверхности различной конфигурации.</p>	<p>ПТЦ, ГТЦ.</p>	<p>Улучшение шероховатости, повышение износостойкости и усталостной прочности. $V_{p.t.} = 1-1,2$ м/с $d_{p.t.} = 1-10$ мм. Все дет. до 2 кг.</p>
<p>Ударно-барабанная обработка</p>	<p>Дробь – тела различной формы из различных материалов. Специальное оборудование.</p>		<p>Поверхности различной конфигурации и типоразмеров.</p>	<p>ПТЦ, ГТЦ.</p>	<p>Улучшение шероховатости, повышение износостойкости и усталостной прочности. $V_{p.t.} = 2-10$ м/с $d_{p.t.} = 2-10$ мм. Длина деталей до 5 м.</p>
<p>Гидродробеструйная обработка</p>	<p>Стальные шарики ШХ15. Специальное оборудование.</p>		<p>Поверхности различной конфигурации и типоразмеров.</p>	<p>ПТЦ.</p>	<p>Улучшение шероховатости, повышение износостойкости и усталостной прочности. $V_{p.t.} = 5-10$ м/с $d_{p.t.} = 0,5-2,5$ мм.</p>
<p>Магнитно-импульсная обработка</p>	<p>Магнитное поле. Специальное оборудование.</p>		<p>Поверхности различной конфигурации.</p>	<p>ПТЦ.</p>	<p>Повышение износостойкости и усталостной прочности.</p>



1.7 Формализация проектирования операций ППД

Проектирование операций ППД является сложной многокритериальной задачей, т.к. требует, как было показано ранее, учета значительного числа факторов, влияющих на результаты обработки. Многообразие таких факторов не позволяет получить строгие функциональные зависимости для расчета оптимальных технологических параметров обработки деталей методами ППД. Следовательно, нужны подходы, которые позволяли бы эффективно осуществлять процесс поиска оптимальных условий обработки деталей и параметров технологической системы операций ППД.

Одним из наиболее перспективных путей в этом направлении, способствующих дальнейшему развитию автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) изготовления деталей машин, является применение методов автоматизированного проектирования операций ППД. Базой для такого подхода к проектированию операций ППД являются обобщенные математические модели процессов обработки ППД, представленные в п. 1.3, позволяющие формализовать расчет оптимальных режимов упрочнения, параметров качества поверхностного слоя, параметров обрабатывающей системы, прогнозирование повышения эксплуатационных свойств деталей в результате ППД.

Для создания САПР операций ППД необходимо формализовать не только расчет параметров процесса ППД, но и другие действия технолога, направленные на выбор метода ППД, подбор оборудования, инструмента или обрабатывающей среды и т.д. Структура САПР операции ППД с учетом проведенных в этом направлении исследований представлена на рис.24, которая включает в себя следующую последовательность действий:

1. Анализ исходных данных для проектирования, которыми являются:
 - а) конструктивные параметры упрочняемой детали: её геометрическое и размерное описание, материал и механические свойства (твёрдость, предел прочности, динамический предел текучести, и т.д.), вес, требуемые эксплуатационные показатели;
 - б) технологические ограничения на операцию: требуемые показатели точности, качества поверхности, минимально допустимые энергосиловые параметры и др.;
 - в) организационно-экономические ограничения: перечень



Технология машиностроения

имеющегося на предприятии оборудования, ожидаемые производительность и себестоимость и при необходимости санитарно-гигиенические и экологические ограничения.

2. Подсистема «Определения участков поверхности детали, требующих упрочнения» (оператор 3) позволяет установить предельно допустимые размеры участков поверхности с целью повышения усталостной прочности детали, у которых величина разноресурсности больше единицы.

Технология машиностроения

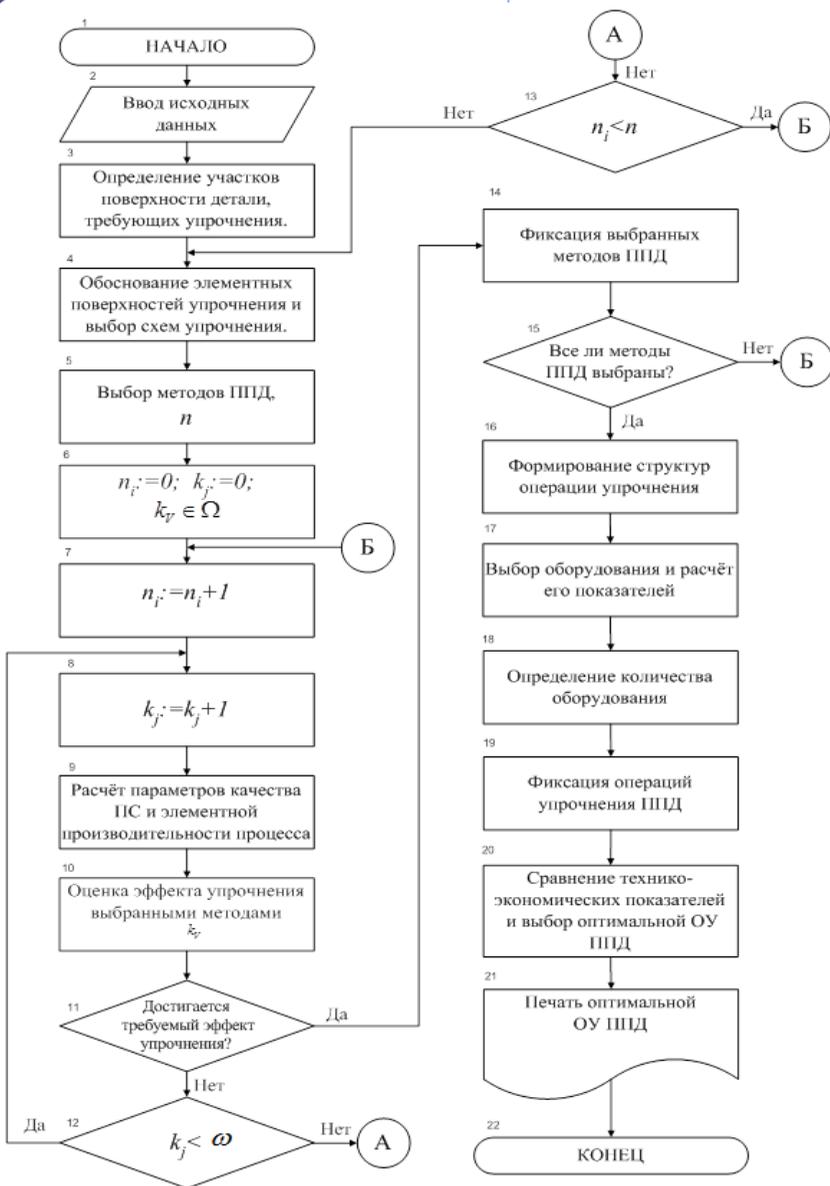


Рис.24. Алгоритм проектирования технологии упрочнения ППД с учётом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей



3. Исходя из конструктивных особенностей участков поверхности детали, требующих упрочнения, их взаимного расположения, с учётом требований к качеству других поверхностей детали, определяют элементные поверхности упрочнения (ЭПУ) и выбирают схему упрочнения детали (оператор 4), руководствуясь рекомендациями и типовыми схемами.

4. На основании выбранной схемы упрочнения предварительно определяют метод или группу методов ППД, обеспечивающих реализацию предлагаемой схемы упрочнения. Выбор возможных методов рекомендуется осуществлять с помощью информационно-поисковой модели, представленной на рис.25, отражающей технологические возможности обработки отдельно выделенных ЭУ с методами ППД, по той или иной схеме обработки. При выборе метода необходимо учитывать форму ЭУ, их доступность и класс самой детали (гладкие цилиндрические, корпусные, вилки и т.д.), с целью определения её положения (подвижное-неподвижное, свободное) в процессе упрочнения ЭУ.

5. В операторе 6 осуществляется присвоение начальных значений выбранных методов ППД ($n_j=0$), коэффициента упрочнения k_v для обеспечения снижения коэффициента разноресурсности Ω , и типа инструмента и режимов упрочнения ($k_j = 0$).

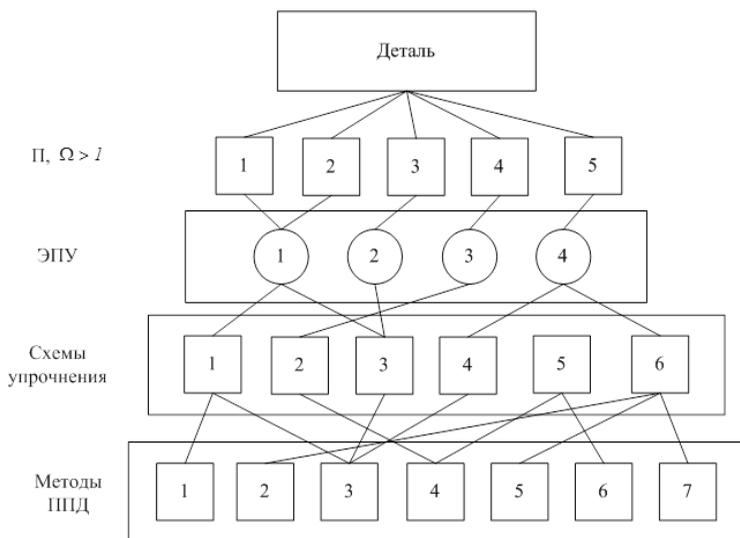


Рис. 25. Информационно-поисковая модель выбора метода ППД упрочнения элементных участков.



6. Операторы 7–15 позволяют определить условия обработки, обеспечивающие требуемый эффект упрочнения, оцениваемый коэффициентом k_v и элементную производительность по каждому предварительно выбранному методу ППД.

В блоке 7 первоначально рассматривается первый метод ППД. Два взаимосвязанных оператора 8–9 осуществляют подбор типа инструмента, режимов обработки и расчёт функциональных параметров качества поверхностного слоя, который будет производиться до тех пор, пока либо не обеспечится требуемый эффект упрочнения (операторы 10, 11), либо не будет достигнуто заданное число циклов подбора ω (оператор 12). Как только число перебираемых вариантов превысит ω и при этом не обеспечится требуемый эффект упрочнения, рассматриваемый метод отбрасывается и осуществляется переход к оценке следующего метода ППД (оператор 13,7). Цикл будет продолжаться до тех пор, пока не будет произведён весь перебор предварительно выбранных методов.

Подбор типа инструмента, его размеров и режимов обработки для технологического обеспечения качества ПС деталей производится по рекомендациям и методикам, предложенных в работах по упрочнению деталей различными методами ППД. Исполнительные размеры инструментов принимаются из стандартного ряда, а режимы упрочнения из условия обеспечения требуемого эффекта и округляются в большую сторону после выбора оборудования, реализующий данный метод и схему упрочнения.

7. Методы, обеспечивающие требуемый эффект упрочнения фиксируются в блоке 14. Оператор 15 включается в работу тогда, когда при выполнении условия в блоке 11 каким-либо методом, необходимо перейти к оценке достигаемого эффекта упрочнения следующего метода.

8. В случае, если ни один из предварительно выбранных методов не обеспечивает требуемый эффект упрочнения, то необходимо выбрать новую схему упрочнения и для её реализации другие методы ППД.

9. В рамках подсистемы «Формирование структуры операции ППД» для выбранной схемы упрочнения и метода (методов) ППД, а также программы выпуска деталей формируется рациональная структура операции ППД путём определения её класса и подкласса.

10. Подсистема «Выбор оборудования и средств технологического оборудования» позволяет, исходя из необходимости



Технология машиностроения

обеспечения выбранной структуры ППД, произвести обоснование принципиальной схемы и основных конструктивных параметров устройств для реализации выбранного (выбранных) метода ППД. Затем на их основе осуществить выбор устройства из числа известных и выпускаемых моделей либо выдать техническое задание на проектирование нового устройства.

Выбор оборудования и средств технологического оснащения производится по рекомендациям и методикам, предложенных в работах по упрочнению деталей выбранным методом.

11. Подсистема «Определение потребного количества оборудования» позволяет обосновать необходимое для выполнения производственной программы количество устройств и инструментов (энергонесущих сред).

12. Предпочтительные операции ППД на основе выбранных методов фиксируются оператором 19, затем определяется оптимальный из них путём сравнения по критериям производительности, энергоёмкости, материалоемкости, надёжности, себестоимости (оператор20).

13. Результаты проектирования технологии упрочнения ППД представляются в виде комплекта технологической документации: маршрутных, операционных карт и т.д.

Реализация такой системы с использованием ЭВМ позволяет полностью формализовать проектирование операций ППД. Структура автоматизированной системы проектирования операций ППД является оптимальной для встраивания её в существующие и проектируемые САПР ТП изготовления деталей.



2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ППД

2.1 Упруго-пластическая деформация – единая основа методов ППД

Упрочнение деталей в процессе ППД есть следствие упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала организованного в условиях конкретного метода ППД.

В соответствии с классификацией, представленной на рис.1, каждый метод может быть отнесен к определенной группе методов, для которой присущи своя отличающая ее от других групп механика деформирования и определяющая способ ППД, специфические для нее особенности формирования геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при обработке, а также условия протекания процесса.

Механика ППД предопределяется характером воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, который при реализации методов ППД твердыми телами может быть либо квазистатическим, либо динамическим. При упрочнении деталей высокоэнергетическими потоками характер воздействия может носить либо импульсный характер, либо постоянно нарастающий (рис.26).

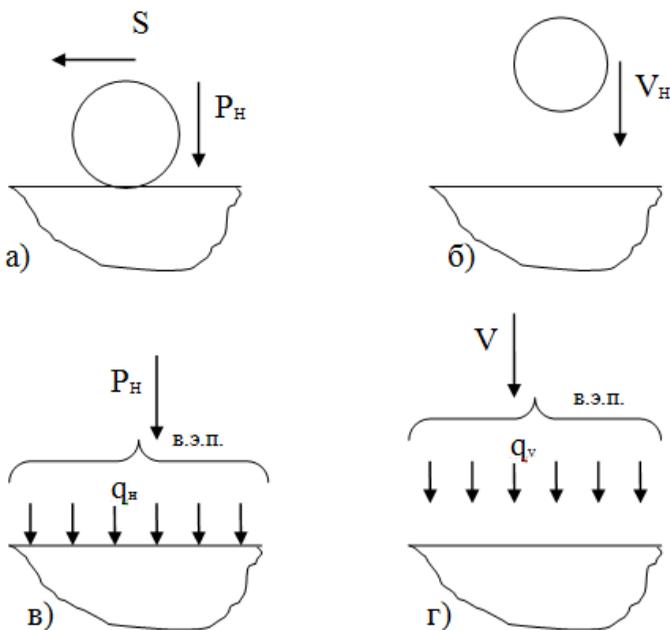


Рис.26. Схемы реализации методов ППД:
 а,б–твердыми телами;
 в,г–высокоэнергетическими потоками (в.э.п.)

В основе механики процесса динамических методов ППД, широко применяемой на операциях упрочнения лежит, динамически дискретный характер силового воздействия индентора на обрабатываемую поверхность, имеющую или полужесткую связь с источником энергии или находящимся в свободно движущемся состоянии.

Формирование поверхностного слоя при обработке деталей динамическими методами происходит в результате последовательного или стохастического нанесения пластических отпечатков, являющихся следствием контактного взаимодействия индентора (или инденторов) с обрабатываемой поверхностью с изменяющимся усилием деформации от нуля до максимального значения.

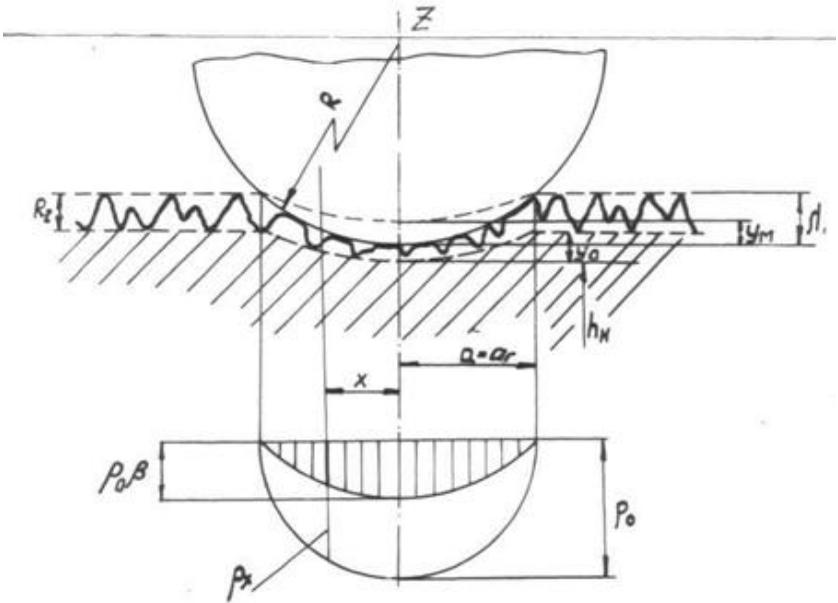


Рис.27. Расчетная схема контактного взаимодействия сферы с шероховатым упругопластическим полупространством

Система пластических отпечатков образует на поверхности детали поверхностный слой, отличающийся от исходного качественно новыми физико-химическими характеристиками и микрорельефом.

Последовательность процесса развития пластической контактной деформации при соударении единичного индентора радиусом рабочей части R с упругопластическим материалом, обладающим известными физико-химическими свойствами, и заданной исходной шероховатостью, описанной нормальным однородным случайным полем состоит из трех этапов. Первый этап – пластически деформируются микронеровности и сплошная контактная площадка отсутствует; второй – соответствует образованию массовых микроучастков контакта; третий этап – характеризуется началом деформации основания микропрофиля.

Допустив, что при дальнейшем развитии процесса контактного взаимодействия микронеровности и их основание деформируются, одновременно величину пластической деформации



в любой точке контурной площадки контакта с радиусом a можно оценить по уравнению

$$y_0 + y_M - y_{0X} - y_{MX} = \frac{X^2}{2R}, \quad (14)$$

где y_0, y_{0X} – деформация основания микропрофиля по оси контакта и на расстоянии X от оси;

y_M, y_{MX} – деформация микронеровностей по оси контакта и на расстоянии X от оси.

Давление в зоне контакта распределяется следующим образом

$$p_{Xш} = p_0 \times \beta \times \sqrt{1 - \frac{X^2}{a^2}}, \quad (15)$$

где $\beta < 1$ – коэффициент, учитывающий влияние характеристик шероховатости на изменение эпюры давления в зоне контакта (рис.28).

p_0 – давление в центре круговой площадки при соударении сферического индентора с гладкой поверхностью.

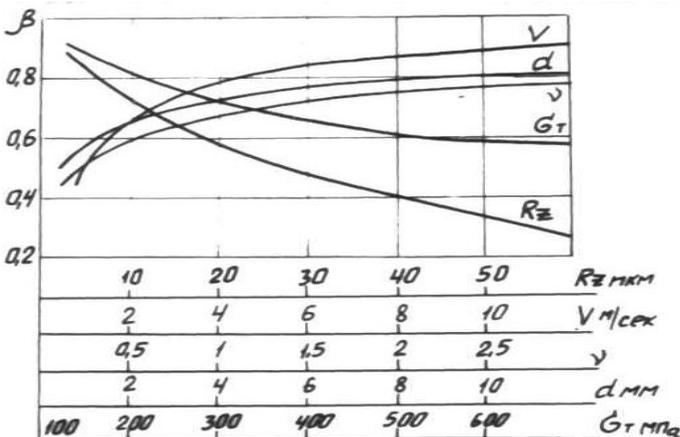


Рис.28. Влияние различных факторов контакта на коэффициент β



Технология машиностроения

Основываясь на законе Герстнера и исследованиях Н.Б.Демкина выражения для определения y_{ox} и y_{mx} в функции от технологических факторов контакта индентора с шероховатой поверхностью имеют вид:

$$y_{ox} = \sqrt{R^2 - X^2} + y_o - R, \quad (16)$$

$$y_o = \frac{P_\delta^2}{2\pi^2 R (C \sigma_\delta) a^2}, \quad (17)$$

$$y_{MX} = R_z \left[\frac{1.5\beta P_\delta \left(1 - \frac{X^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}}}{\pi a_r^2 \eta \epsilon \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}}, \quad (18)$$

$$y_M = R_z \left[\frac{1.5\beta P_\delta}{\pi a_r^2 \eta \epsilon \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}}, \quad (19)$$

где P_δ – максимальная динамическая нагрузка, вызывающая возникновение пластической деформации в зоне контакта сферического индентора с гладкой поверхностью;

C – коэффициент стеснения ($C = 2,8 \div 3$);

σ_δ – динамический предел текучести ($\sigma_\delta = K_q \sigma_s$);

K_q – коэффициент, учитывающий изменение механических свойств материала при динамическом нагружении;

σ_s – статический предел текучести материала;

a_r – радиус контакта при соударении сферы с гладкой поверхностью;

η – коэффициент, характеризующий упругую осадку микронеровностей ($\eta = 1 \div 1,2$);

ν, ω – параметры опорной кривой микропрофиля соударяемых тел;

B, ω – коэффициенты, характеризующие контактные напряжения на выступах, зависящие от форм и свойств материала.

Решение выше приведенных уравнений при $X=0$ и $X=a$ по-



Технология машиностроения

зволили получить зависимость для определения размеров пластического отпечатка формируемого на поверхности при однократном соударении индентора

$$\lambda_1 = \frac{P_\delta^2}{\pi^2 d \left(\sigma_\delta \right) a^2} + R_z \left[\frac{1.5 P_\delta}{\pi a^2 \eta \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}}, \quad (20)$$

$$a_1^4 = \frac{P_\delta^2}{\pi^2 \left(\sigma_\delta \right) a^2} + R_z d \left[\frac{0.477 P_\delta}{\eta \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}} a^{\frac{2(\nu+\omega+1)}{\nu+\omega}}. \quad (21)$$

Однако в процессе обработки динамическими методами ППД инденторы инструмента или обрабатывающей среды воздействуют на обрабатываемую поверхность, многократно вызывая увеличение параметров пластической деформации. Изменение максимальной динамической силы в зоне контакта, вызывающей увеличение размеров пластических отпечатков может быть оценено по формуле

$$P_{\delta_i} = P_\delta K_{\mu_{i-1}} \left(1 + \sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{K_{\mu_{i-1}}} \right)^{0.5}, \quad (22)$$

где P_δ – максимальная динамическая нагрузка, вызывающая пластическую деформацию в зоне контакта при однократном соударении.

$K_{\mu_{i-1}}$ – коэффициент деформационного упрочнения,

$$K_{\mu_{i-1}} = e^{\varepsilon_i}$$

i – кратность покрытия поверхности следами ударов;

ε_i – отношение диаметра пластического отпечатка к диаметру рабочей части индентора.

Представление P_δ в функции от скорости соударения индентора V позволяют рекомендовать следующие зависимости для расчета геометрических размеров пластических отпечатков формируемых в процессе многократного динамического воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность



$$a_i^4 = \frac{V^{1+n} K_M^2}{\pi^2 C \sigma_\delta} \left(1 + \sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{K_{\mu_{i-1}}} \right) + R_Z d \left[\frac{0.477 V^{1+n} K_M K_{\mu_{i-1}}}{\eta \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}} \left(1 + \sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{K_{\mu_{i-1}}} \right)^{\frac{1}{2(\omega+\omega)}} \frac{2(\omega+\omega)}{V^{1+n}} a_i \quad (23)$$

$$\lambda_i = \frac{V^{1+n} \beta}{\pi d C \sigma_\delta} \left(1 + \sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{K_{\mu_{i-1}}} \right)^{0.5} + R_Z \left[\frac{1.5 C \sigma_\delta K_{\mu_{i-1}} \beta}{\eta \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}}, \quad (24)$$

где K_M – комплексный коэффициент, учитывающий массу индентора и податливость обрабатываемого материала.

$d = 2R$, R_Z – высота микронеровностей.

В результате исследований на минимум этих зависимостей получена формула для определения минимальной скорости соударения, при которой начинается деформация основания микропрофиля и как следствие наблюдается эффект упрочнения поверхностного слоя.

$$V_{\min} = \left\{ \frac{R_Z d}{K_M} \left[\frac{0.477 C \sigma_\delta}{\eta \psi B} \right]^{\frac{1}{\nu+\omega}} \frac{2(\omega+\omega)}{V^{1+n}} \right\}^{\frac{1+n}{2n}} \quad (25)$$

Практическая значимость этой формулы состоит в том, что она позволяет исходя из физико-механических характеристик обрабатываемого материала, параметров исходной шероховатости поверхности, выделить диапазоны скоростей отделочной и с преобладанием упрочняющей обработки динамическими ППД.

Рассматривая механику деформирования поверхностного слоя при обработке деталей этой группой методов следует отметить экспериментально установленный факт, характеризующийся образованием вокруг отпечатка валика некоторой части вытесненного материала (Рис.27). Образующийся валик является следствием интенсивной пластической деформации поверхности и оказывает влияние на параметры микрорельефа поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики деталей.

Анализ коррелограмм микропрофилей поверхностей формируемых в процессе ППД динамическими методами свидетельствует, что они могут быть отнесены к классу периодических



Технология машиностроения

поверхностей. Это обстоятельство позволяет смоделировать реальный микрорельеф поверхности, сформированный при сплошном покрытии её пластическими отпечатками, в виде условно регулярного (УРМР) с правильными многоугольными элементами вогнутой формы, образующимися в результате перекрытия смежных отпечатков с приведенным для данной поверхности, радиусом $a_{np} \approx a_1$ (рис.29, рис.30).

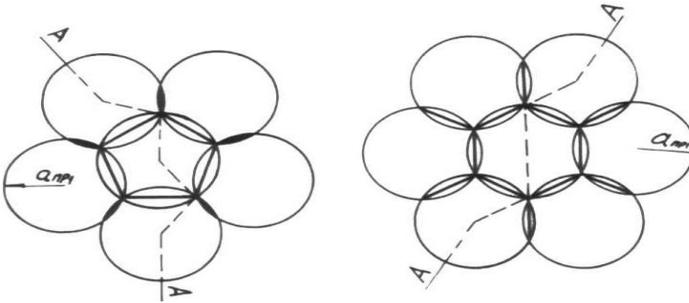


Рис.29. Условная схема расположения пластических отпечатков на обрабатываемой поверхности

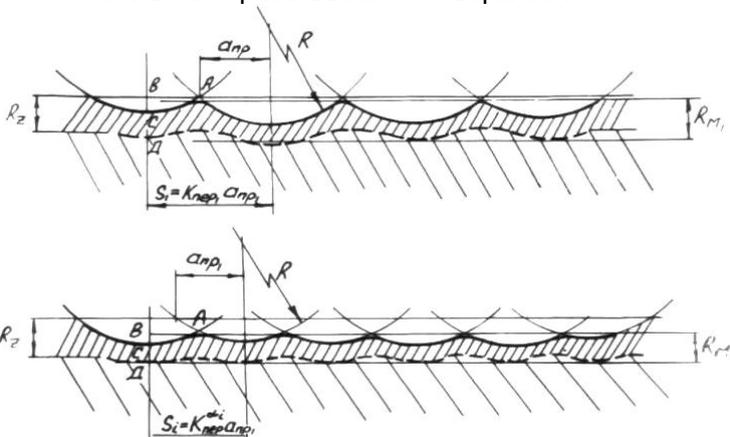


Рис.30. Схема для расчета параметров микропрофиля поверхности, формируемой в процессе ППД динамическими методами

На основе представления микропрофиля поверхности в



Технология машиностроения

виде УРМР получены зависимости для расчета его геометрических параметров регламентированные ГОСТ 24773-81 в частности: высоты микронеровностей

$$R_{Mi} = \left\{ R_z + \frac{a_1^2}{4d} \left[K_{nep1}^{2\alpha_i} - \frac{4}{\alpha_i^2} \left(-\beta^2 \right) \right] \right\} K_c, \quad (26)$$

где K_{nep} – коэффициент вероятности перекрытия пластических отпечатков после однократного покрытия поверхности следами ударов $K_{nep} = 1,8$

α_i – отношение, определяемое из отношения – $\frac{a_1}{a_i}$

K_c – коэффициент сглаживания микропрофиля в зависимости от базового элемента УРМР (для УРМР с шестиугольными элементами $K_c = 0,65$, пятиугольными элементами $K_c = 0,6$)

- относительной опорной площади поверхности на произвольном уровне ρ смоделированной, например шестиугольным элементом

$$T_{\rho_i} = 1 - \frac{\sqrt{3dR_{Mi} \left(-\rho \right)}}{K_{nep1}^{\alpha_i} a_1}, \quad (27)$$

Пластическое деформирование детали при обработке динамическими методами сопровождается возникновением в поверхностном слое остаточных напряжений, которые являются следствием роста плотности дислокаций вызывающих увеличение объема деформируемого слоя. Однако этому увеличению препятствуют (в силу плотности материала) ниже лежащие слои. В результате такого взаимодействия в наружных слоях возникают напряжения сжатия, а во внутренних – уравновешивающие их растягивающие напряжения.

Накопленный в настоящее время материал по изучению явлений, связанных с возникновением остаточных напряжений в поверхностном слое при ППД, позволяет предложить инженерные зависимости, которые в первом приближении с достаточной для практики точностью могут быть применены для оценки объемно – напряженного состояния поверхности при различных условиях ППД деталей.

Установлено, что при обработке динамическими ме-



Технология машиностроения

тодами процесс ППД носит в каждый момент времени местный характер и протекает в условиях циклического нагружения. Однако при обеспечении сплошности покрытия поверхности следами ударов 1, 2 и более раз характер деформированного состояния поверхностного слоя оказывается такой же, как и после квазистатического нагружения его равномерно распределенной нагрузкой. Таким образом, можно предположить, что деформация практически однородна во всех слоях поверхностного слоя.

Не учитывая структурные явления и разделив весь процесс упрочняющей обработки на два этапа: нагрузка и разгрузка, и используя основные положения теории механики деформируемого твердого тела, зависимости для расчета остаточных напряжений первого рода по глубине упрочненного слоя будут иметь вид:

$$\sigma_x^o = \frac{\sigma_{\partial_i}}{2Z_1} \left[K_z - 1 \right] Z_p - \left[K_z + 1 \right] Z_{1-}, \quad 0 < Z_p < Z_1, \quad (28)$$

$$\sigma_x^o = \frac{3\sigma_{\partial_i}}{2Z_2} \left[Z_p - \frac{2}{3}Z_2 - Z_1 \right], \quad Z_1 < Z_p < h_H, \quad (29)$$

где Z_1 – глубина залегания максимальных касательных напряжений (для нормального контакта в условиях сухого трения $Z_i = (0,3 \div 0,4)a$; при наличии жидкости в зоне контакта $Z_i = (0,05 \div 0,1)a$),

$$Z_2 = h_H - Z_i,$$

h_H – глубина наклепанного в процессе ППД слоя,

K_z – коэффициент спада остаточных напряжений, зависящий от условий контактного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью ($K_z = 0,3 \div 0,4$ – сухое трение, $K_z = 0,05 \div 0,1$ при наличии жидкости в зоне контакта).

Таким образом, в упрочненном поверхностном слое можно выделить условно две зоны разделенных линией залегания максимальных остаточных напряжений. Остальные слои материала при $Z_p > Z_1 + Z_2$ находятся в упругом состоянии.

При обработке деталей предрасположенных к упрочнению динамическими методами ППД повышение их эксплуатационных

Технология машиностроения

свойств обеспечивается за счет формирования поверхностного слоя с повышенной микротвердостью, достаточной толщины (глубины упрочнения). В качестве примера на рис.31 – 34 показано влияние, одного из динамических методов упрочняющей обработки деталей – метода виброударной обработки на изменение микротвердости поверхностного слоя.

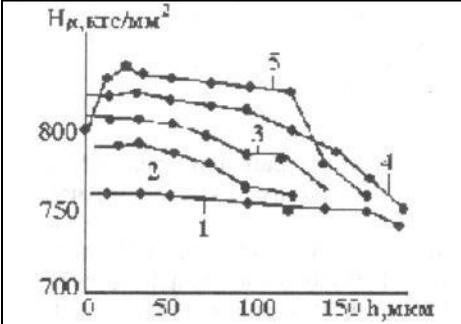


Рис.31. Изменение H_{μ} в поверхностном слое при обработке стали 30X3BA при $f=30$ Гц:

- 1–исходная; 2– $t=60$ мин, $A=2,5$ мм;
- 3– $t=120$ мин, $A=2,5$ мм;
- 4– $t=120$ мин, $A=4,5$ мм;
- 5– $t=180$ мин, $A=4,5$ мм

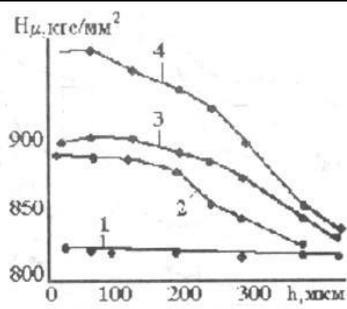


Рис.32. Изменение H_{μ} в поверхностном слое при обработке стали 20X3VMF при $f=30$ Гц, $A=4,5$ мм:

- 1–исходная; 2– $t=60$ мин, стальные шары;
- 3– $t=120$ мин, стальные шары; 4– $t=180$ мин, $A=4,5$ мм;

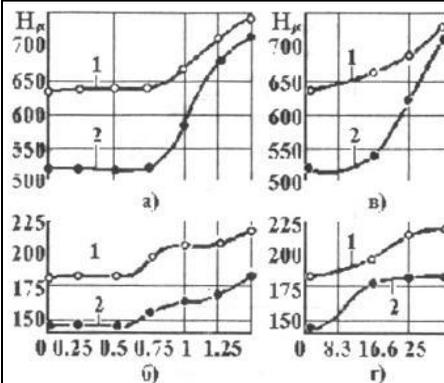


Рис.33. Влияние амплитуды и частоты колебаний на микротвердость поверхностного слоя стали:

- 1 – ШХ15; 2 – 40X.
- Закаленная – а, в; отожженная – б,г

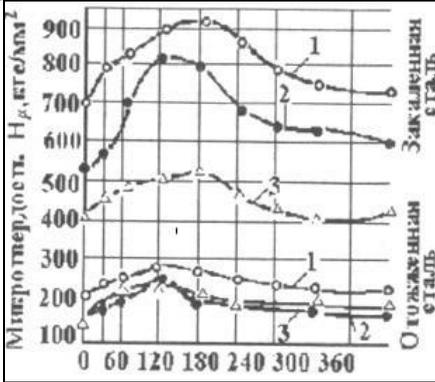


Рис.34. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от продолжительности виброобработки в стальных шариках:

$$A = 1,5 \text{ мм}; f = 33,3 \text{ Гц}$$

Глубина упрочненного слоя h может быть определена по формуле

$$h_{H_i} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{K_M \beta}{2C\sigma_\delta} \left(1 + \sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{K_{\mu_{i-1}}} \right)^{0.5}}, \quad (30)$$

при этом предполагается, что поверхность детали сплошь покрыта пластическими отпечатками.

Из приведенной зависимости следует, что эффективность обработки зависит главным образом от динамических характеристик процесса, т.е. от скоростей встречного движения частиц (инденторов) обрабатывающей среды и детали. Это обстоятельство заставляет чаще всего применять при упрочняющей обработке свободно – движущимися инденторами схему обработки с закреплением деталей, т.к. при свободной их загрузке, в частности в замкнутом объеме, деталь увлекается конвективными потоками обрабатывающей среды, и за счет этого встречная скорость уменьшается.

Результаты исследований, проведенные Е.В. Матюхиным применительно к технологической задаче виброударного упрочнения металлообрабатывающего инструмента позволяют установить зависимость получаемой микротвердости от условий обработки и времени обработки. Так из графиков на рис.35 видна превалирующая зависимость результатов упрочнения от амплитуды колебаний рабочей камеры виброударного станка, главным образом влияющей на скорость ударного взаимодействия инденторов с деталью. Зависимости от времени носят экстремальный характер. Из графиков (рис.35) следует, что процесс упрочнения за определенное время достигает порога насыщения, после чего



Технология машиностроения

начинается разупрочнение (или перенаклеп), сопровождающийся ухудшением состояния поверхности.

Экспериментами установлено, что частота вибраций рабочей камеры, в которую загружена обрабатывающая среда, определяет общее количество ударов инденторов среды, воспринятых поверхностью детали, и таким образом является определяющим фактором, обуславливающим сплошность покрытия поверхности пластическими отпечатками. Однако сила удара формирующая отпечаток требуемой глубины, зависит главным образом от амплитуды. Это утверждение наглядно иллюстрируется на рис.36 – 39.

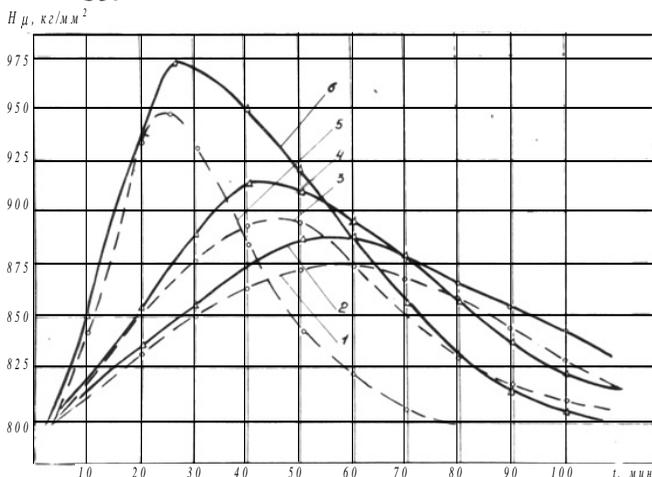


Рис.35. Влияние времени обработки (t), амплитуды вибрации (A), диаметра шарика на значение поверхностной микротвердости сталей X12M и P18 ($f=35$ Гц):

- 1,2 - $A=2$ мм;
- 3,4 - $A=2,5$ мм;
- 5,6 - $A=3,5$ мм;
- 1,3,5 - $d=8$ мм;
- 2,4,6 - $d=14$ мм

Приведенные иллюстрации процесса ППД в условиях виброударной обработки построены проектированием полиномиальной модели, полученной планированием эксперимента, на плоскости факторного пространства. Они демонстрируют практически линейную зависимость результатов упрочнения от амплитуды вибраций, как основного фактора определяющего силовые характеристики инденторов обрабатывающей среды, при достижении частотой и временем соответствующих пороговых значений. Превышение этих пороговых значений не дает прироста микротвердости и глубины упрочнения.

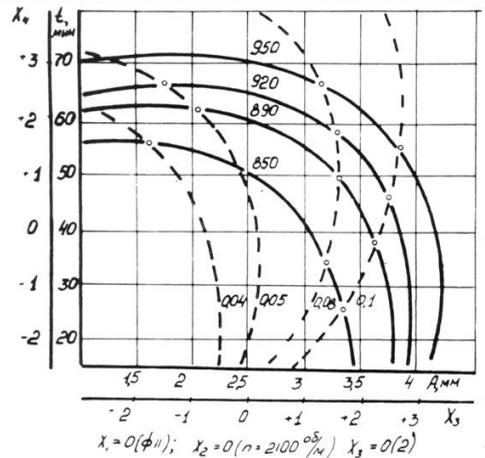
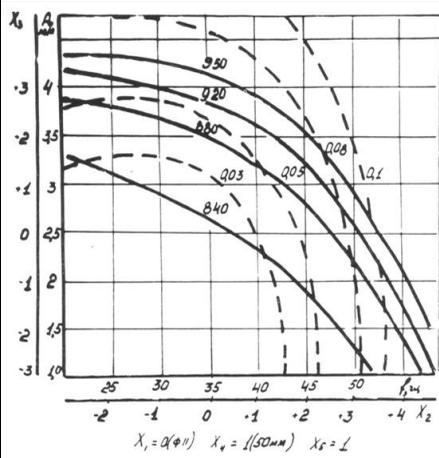


Рис.36. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} (кг/мм^2) и глубины упрочнения h (мм) от амплитуды A и частоты f вибрации. $d=11$ мм, $t = 50$ мин

Рис.37. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} (кг/мм^2) и глубины упрочнения h (мм) от времени обработки t и амплитуды вибрации. $d=11$ мм

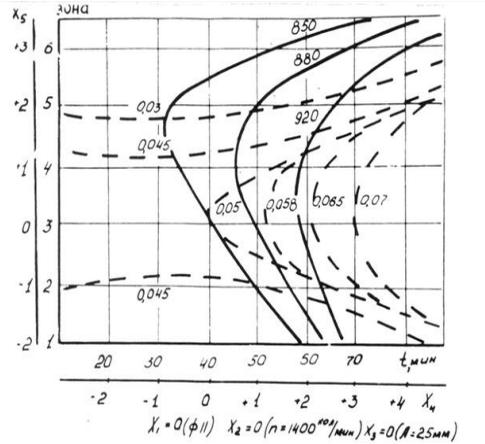
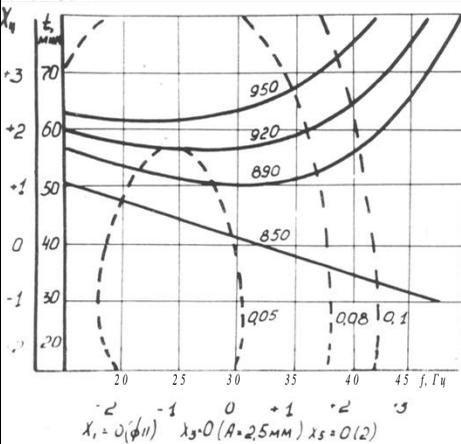


Рис.38. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} (кг/мм^2) и глубины упрочнения h (мм) от времени t и частоты f вибраций

Рис.39. Зависимость поверхностной микротвердости H_{μ} (кг/мм^2) и глубины упрочнения h (мм) от времени t и зоны обработки



2.2 Энергетические аспекты и критерий упрочнения деталей динамическими методами ППД

Протекание в поверхностном слое (ПС) под воздействием инструмента или энергонесущей среды механических, тепловых и структурно-фазовых явлений приводит к его упрочнению и, как следствие, формированию качественно нового поверхностного слоя с более высокими физико-механическими характеристиками, оказывающего благоприятное влияние на повышение таких эксплуатационных свойств деталей, как усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость.

Основным показателем эффективности упрочнения деталей тем или иным методом ППД является величина повышения их эксплуатационных свойств. Однако определение ее в реальных условиях — процесс трудоемкий из-за необходимости проведения длительных экспериментальных и натурных испытаний.

В этой связи разработка расчетно-аналитических моделей прогнозирования эффективности обработки методами ППД, объективно отражающих физико-химическую сущность процессов, протекающих в ПС при пластической деформации, имеет важное практическое значение, особенно при проектировании операций ППД на стадии технологической подготовки производства. На основании многочисленных исследований, проведенных в этой области, предложено много инженерных методов расчета технологических параметров процесса, характеристик качества ПС и эксплуатационных свойств деталей, в основу которых положены фундаментальные положения механики твердого тела, теории упругости и пластичности. Вместе с тем развитие в науке о прочности нового направления, основанного на кинетическом, термоактивационном рассмотрении механизмов и закономерностей пластической деформации и разрушения реальных материалов, позволяет учесть современных представлений подойти к решению этой задачи.

По современным представлениям [11,12] любой процесс деформирования и разрушения, а значит, и процесс ППД является кинетическим и необратимым процессом независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения.

Кинетическая сущность процесса ППД заключается в объемной повреждаемости ПС, при которой в деформируемом элементе зарождаются и накапливаются различного рода де-



Технология машиностроения

фекты и повреждения. Представление процесса ППД как кинетического вытекает из двух экспериментально установленных фактов, из которых первый свидетельствует о его статистическом характере, второй — раскрывает его феноменологическую сторону.

В основе феноменологичности процесса лежит зависимость упрочнения элемента ПС от силовых параметров нагружения и времени (циклов) их воздействия (рис.40), из которой следует, что если два процесса ППД, сопровождающихся упрочнением а, следовательно, внутренней повреждаемостью элемента поверхности, протекают как при более высоких внешних силовых параметрах нагружения, так и при более низких, то разница в поведении деформируемого элемента ПС будет зависеть только от скорости (степени) повреждаемости.

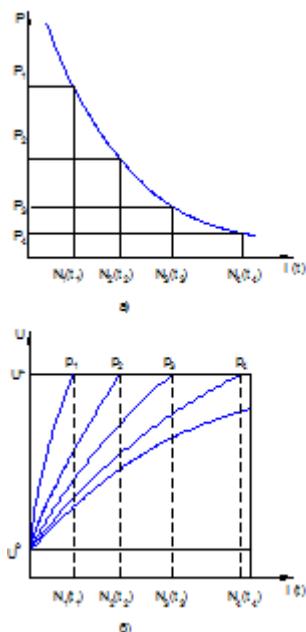


Рис.40. Кинетика процесса ППД

Статистически процесс ППД выглядит следующим образом. В каждый момент времени (цикл) деформирования элемента ПС заданным условиям нагружения соответствует определенная степень его повреждаемости. Как только повреждаемость материала в локальном микрообъеме достигает предель-



Технология машиностроения

ной (критической) величины, начинается процесс его разрушения в виде микро – и макронарушений.

Подтверждением этого являются результаты экспериментальных исследований влияния продолжительности ППД на усталостную прочность и износостойкость образцов, которые показали, что с появлением в ПС признаков разрушения (микротрещины) эксплуатационные показатели образцов начинают снижаться. Это позволило сделать вывод, что наибольший эффект упрочнения ППД достигается за промежуток времени или циклов нагружения, при котором в элементах ПС накапливается критическая (предельная) повреждаемость. Изложенные выше представления и закономерности процесса ППД могут быть описаны и проиллюстрированы следующим образом. Обозначим через U количественную меру повреждаемости элемента ПС в процессе ППД, через U_i — степень повреждаемости, а через \dot{U}_i — скорость повреждаемости за один цикл нагружения. Тогда при любом способе внешнего силового нагружения (динамическом или квазистатическом) повреждаемость элемента ПС при каждом цикле нагружения будет изменяться со скоростью \dot{U}_i , которая в общем случае будет являться функцией силового параметра P деформирования и времени t_i протекания процесса.

Графически это можно представить в виде кинетических кривых (рис.40.б), из которых следует, что по мере деформирования элемента ПС его повреждаемость увеличивается. Это увеличение происходит до тех пор, пока повреждаемость U не достигнет критической величины U^* , зависящей от свойств обрабатываемого материала и не зависящей от способа силового нагружения. Последнее обстоятельство обусловлено феноменологичностью процессов деформирования и разрушения материалов. На рис.40.а представлена зависимость повреждаемости элемента ПС от силовых параметров и числа циклов нагружения. Аналогичные кривые могут быть построены для любого уровня повреждаемости $U < U^*$.

Запишем условие предельной повреждаемости элемента ПС в виде:

$$U = U_0 + \sum_{i=1}^{i=N} U_i = U^* = const \tag{31}$$

где U_0 — уровень поврежденности элемента ПС, накопленный на стадии обработки, предшествующей ППД; N — предельное число циклов внешнего силового нагружения;



$$U_i = \int_0^{t_i} U_i(t) dt .$$

Принимая, что повреждаемость деформируемых в процессе ППД объемов при каждом цикле носит необратимый характер, а степень упрочнения есть результат накопления (суммирования) поврежденностей, можно сделать вывод, что предельная повреждаемость и, как следствие, предельное упрочнение ПС произойдет тогда, когда сумма относительных повреждений станет равной 1, т.е.

$$\frac{1}{U^*} \sum_{i=1}^{i=N} \int_0^{t_i} U_{i(t)} dt = 1 \quad (32)$$

Эта зависимость позволяет прогнозировать предельное число циклов силового нагружения ПС деталей с целью достижения в нем максимальной степени упрочнения при условии знания зависимости $U_i(P, t_i)$.

Таким образом, в соответствии с современными представлениями процесс упрочнения ПС деталей методами ППД есть кинетический процесс, протекающий во времени.

Однако для практического применения зависимостей (31), (32), описывающих процесс ППД с точки зрения кинетики, при проектировании операций ППД необходимо, прежде всего, выявить параметр U , способный интегрально характеризовать повреждаемость элемента ПС в процессе ППД. С этой целью рассмотрим процесс ППД с позиции термодинамической теории [11], энергетически синтерпретировав его как процесс протекания двух противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах ПС явлений: роста плотности скрытой энергии ΔE_c различного рода дефектов и повреждений, накапливающихся в материале вследствие работы внешних сил $A_{пл}$, и снижения ее вследствие различного рода релаксационных процессов, протекающих внутри деформируемого элемента ПС (Рис.41). При этом рост плотности скрытой энергии связан с повреждаемостью материала и, как следствие, упрочнением ПС, а ее снижение — с динамическим возвратом (разупрочнением) вследствие теплового эффекта q пластической деформации.

Тогда согласно основному закону термодинамики — закону сохранения энергии — при ее превращении уравнение энергетического баланса процесса ППД для единичного объема запишется в виде



$$A_{пл} = \Delta E_c + q \quad (33)$$

Экспериментально установлено, что значительная часть тепловой энергии, связанной с тепловым эффектом пластической деформации, не задерживается в деформируемом элементе ПС, а рассеивается по телу детали, деформирующим телом и в окружающую среду за счет теплообмена \vec{q} . И лишь незначительная часть этой энергии задерживается в деформируемом элементе, повышая его внутреннюю энергию на величину ΔE_T . Таким образом, тепловой эффект пластической деформации можно представить как $q = \vec{q} + \Delta E_T$, а уравнение энергетического баланса в виде $A_{пл} = \Delta E + \vec{q}$.

Накапливаемая в деформируемом элементе ПС внутренняя энергия ΔE определяется суммой двух составляющих: потенциальной (скрытой) ΔE_c и кинетической (тепловой) ΔE_T : $\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_T$.

Эта энергия связана с повреждаемостью материала (ΔE_c) и его термическим разупрочнением (ΔE_T), является ответственной за прочностные свойства ПС, формируемого в процессе ППД, а значит, вполне обоснованно может быть принята за интегральную меру повреждаемости элемента ПС.

Учитывая, что упрочнению методами ППД, как правило, подвергаются детали, предварительно прошедшие механическую формообразующую обработку, для оценки и прогнозирования прочностных свойств ПС необходимо учитывать внутреннюю энергию E_0 , запасенную в деформируемом элементе на предшествующих ППД этапам обработки. В общем виде энергетическое состояние деформируемого в процессе ППД элемента ПС можно представить так: $E = E_0 + \Delta E$.

В соответствии с кинетическими представлениями процесса ППД максимально упрочненным ПС считается, когда плотность E внутренней энергии в деформируемых элементах, находящихся на поверхности детали, достигнет предельной величины E^* . Это состояние ПС для конкретных условий ППД характеризуется наиболее высокими прочностными свойствами, так как твердость, остаточные напряжения и обеспечивают максимальное повышение эксплуатационных характеристик детали. Следовательно, величина предельной плотности внутренней энергии может быть предложена в качестве критерия эффективности процесса ППД, а



Технология машиностроения

энергетическое условие предельной деформируемости элемента ПС записано в виде:

$$E(h, t) = E_0(h, 0) + \sum_{i=1}^{i=N} \int_0^{t_i} E_i(h, t_i) dt = E^* = const,$$

где $E_0(h, 0)$ - плотность внутренней энергии в элементе ПС в исходном (до ППД) состоянии ($t = 0$), учитывая наследственные свойства материала; $E(h, t_i)$ — скорость изменения плотности внутренней энергии в элементе ПС при единичном цикле силового нагружения.

Для количественной оценки предельной плотности E^* внутренней энергии, при которой в процессе ППД достигается максимальное с точки зрения влияния на эксплуатационные свойства детали упрочнение ПС, воспользуемся аналогией между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении и при нагреве. И в том, и в другом случае нарушение межатомных связей наступает в результате поглощения предельной для данной кристаллической решетки величины энергии.

В случае нагрева металла от заданной температуры T_{II} до температуры T_S плавления, поглощаемая предельная удельная энергия

$$F = \int_{T_{II}}^{T_S} c_p dT + L_{пл}, \tag{34}$$

где c_p – удельная теплоемкость, $L_{пл}$ – скрытая теплота плавления.

Величина $\int_{T_{II}}^{T_S} c_p dT$ характеризует изменение теплосодер-

жания металла при нагреве от заданной температуры до температуры плавления и расходуется на возбуждение атомных колебаний критической величины без нарушения межатомных связей. Эти нарушения возникают, когда кристаллическая решетка поглощает дополнительную энергию, равную скрытой теплоте плавления.



Технология машиностроения

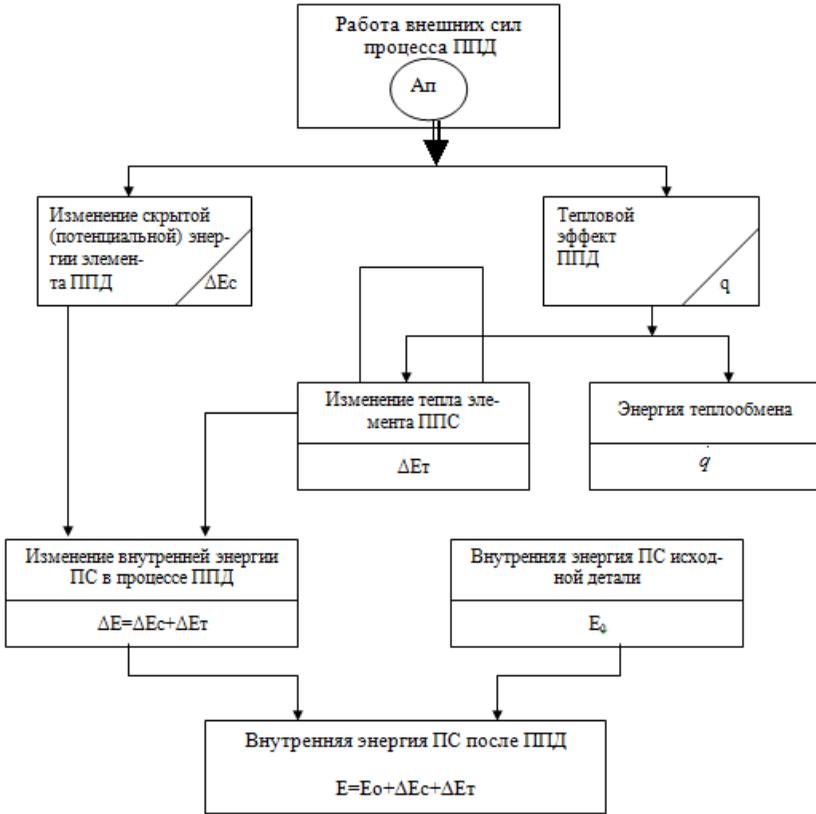


Рис.41. Распределение энергии при ППД

При механическом нагружении до разрушения ПС, как и при плавении, процессу нарушения межатомных связей предшествует искажение кристаллической решетки до критической величины с той лишь разницей, что при механическом нагружении предельное искажение кристаллической решетки обусловлено скоплением в деформируемых локальных объемах ПС критической плотности дислокаций, при которой дальнейшее поглощение энергии кристаллической решеткой приводит к нарушению межатомных связей.

Если принять, что удельная энергия, затрачиваемая на предельное искажение кристаллической решетки, не зависит от вида подводимой энергии (тепловая или механическая), то предельная удельная энергия, которую способна поглотить кристаллическая решетка, должна соответствовать величине H^* равной



Технология машиностроения

разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии, при температуре плавления H_{TS} и энтальпии при 293^0 К:

$$\int_0^{T_s} c_p dT = H^* = H_{TS} - H_{293}.$$

Ниже приведены значения H^* для металлов наиболее часто применяемых в качестве основы сплавов:

Металл	H^* , МДж/м ³
Железо	10500
Алюминий	1800
Титан	5250
Медь	4150

Отсюда следует, что критическая плотность E^* внутренней энергии, накапливаемой в деформируемом элементе ПС после ППД, количественно может быть оценена посредством термодинамической константы H^* : $E^* = \Delta E^* + E_o = H^*$.

Тогда выражение (33) удельной работы, затрачиваемой на предельное упрочнение элемента ПС при ППД для конкретных условий силового нагружения, можно записать так:

$$A_{nl}^*(p, t) = \left(+ K_{T.П} \right) \Delta H,$$

где $\Delta H = H^* - E_o$ – изменение энтальпии металла в процессе ППД; $K_{T.П} > 1$ – коэффициент, учитывающий величину тепловой энергии пластической деформации, не задерживаемой в деформируемом элементе ПС ($q = K_{T.П} \Delta H$). По данным работы [12] $K_{T.П} = 3,5 \div 4,0$.

Следует отметить очень важное обстоятельство: подобная аналогия правомерна только на уровне локальных объемов металла, которые насыщены удельной энергией предельной величины. Перенос же ее на уровень больших объемов не правомерен по следующей причине: в процессе нагрева энергия поглощается кристаллической решеткой практически равномерно по всему объему металла, а при пластической деформации вследствие анизотропности и несовершенств кристаллической решетки происходит неоднородное поглощение энергии.

С целью учета этого фактора рассмотрим объемы, принимающие участие в поглощении энергии в процессе ППД с момента начала силового нагружения до момента максимального упрочнения ПС.



Предположим, что при подведении механической энергии к детали объемом V процессом пластической деформации к моменту максимального упрочнения охватывается ПС объемом $V_s < V$ (рис.42). В процессе нагружения в локальных объемах, находящихся на границе контакта поверхности с инструментом или энергонесущей средой, искажения кристаллической решетки достигают предельно возможной величины. Обозначим объем поверхностного слоя детали, в котором образуются искажения критической величины через V_{II} . Величина удельной энергии предельного искажения, поглощенная единичным локальным объемом ΔV_{II} согласно рассмотренной выше энергетической интерпретации процесса ППД должна соответствовать изменению ΔH энтальпии. Тогда предельная энергия искажения

$$Q_{II} = V_{II} \Delta H. \quad (35)$$

Каждый единичный локальный объем в охватываемом пластической деформацией объеме V_s , за исключением критического объема искажения, накапливает в процессе механического воздействия какую-то энергию искажения, численно равную $n\Delta H$, где n зависит от глубины h залегания локального объема в пределах объема V_s и изменяется от 1 при $h = h_{II}$ до 0 при $h = h_s$. Приняв $n = n(h)$, получим величину энергии, поглощенной объемом $V_s - V_{II}$,

$$Q_s = (V_s - V_{II}) \Delta H \int_{h_{II}}^{h_s} n(h) dh \quad (36)$$

Суммируя выражения (35) и (36), получим выражение для общей энергии, поглощаемой ПС детали в процессе ППД,

$$Q_y = Q_s + Q_{II} = (V_s - V_{II}) \Delta H \int_{h_{II}}^{h_s} n(h) dh + V_{II} \Delta H \quad (37)$$

Величина Q_y характеризует общую энергоемкость предельно упрочненного ПС детали с учетом неоднородности поглощения энергии по глубине. Современные представления о механизме пластической деформации и упрочнения материалов и его дислокационный характер свидетельствуют, что величина V_{II} охватывающая предельно искаженный объем ПС, будет определяться в основном типом кристаллической решетки материала и не зависит от способа силового нагружения.

В работе [12] показано, что глубина h_{II} залегания объема находится в пределах среднего размера зерна. Способ силового нагружения, как и структурное состояние материала, отражается



Технология машиностроения

величинами V_s и η . Значения этих величин зависят от исходного состояния материала (способа изготовления, режима термообработки, наличия концентраторов напряжения), вида и способа деформирования.

Разделив обе части уравнения (37) на V_s , получим выражение, позволяющее оценить величину плотности внутренней энергии, накапливаемой локальным микрообъемом ПС, в зависимости от глубины его расположения от наружной поверхности детали в пределах ПС:

$$\Delta E(h) = \Delta H \eta(h), \quad (38)$$

где $\eta(H)$ — энергетический коэффициент, учитывающий структурное состояние материала, вид и способ ППД и изменяющийся от 1 до 0.

С учетом исходного (до ППД) состояния ПС выражение (38) записывается в виде: $\Delta E(h) = E_o + \Delta H \eta(h)$.

На рис.42 представлены объемы, накапливающие энергию в процессе ППД, и графическая интерпретация их энергетического состояния.

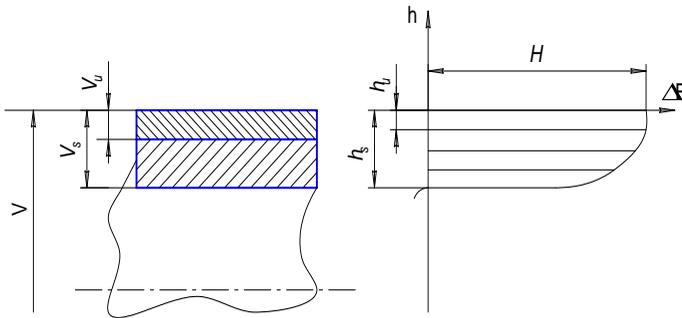


Рис.42. – Энергетическое состояние поверхностного слоя после ППД

Многочисленные экспериментальные исследования физико-механических характеристик ПС после ППД позволяют с



Технология машиностроения

достаточной для практики точно принять линейный закон изменения энергетического коэффициента $n(h) = 1 - h/h_s$. Тогда удельная работа, затрачиваемая на пластическую деформацию локального объема, находящегося на расстоянии h_i от поверхности в пределах предельно упрочненного ПС, составит:

$$A_{\text{ПД}(P,t,h_i)} = \left(+ K_{T,\text{П}} \int \Delta H n(h_i) \right). \quad (39)$$

Для обоснования технологических режимов обработки деталей методами ППД требуется количественно оценить необходимую для эффективного упрочнения ПС работу инструмента или энергонесущей среды, приходящейся на единицу поверхности. В общем виде предельно допустимое (без разрушений) энергетическое состояние единичного объема ПС высотой h_s можно записать следующим образом:

$$W_{\text{ПД}(P,t)}^* = \sum A_{\text{ПД}(P,t,h_i)} = \left(+ K_{T,\text{П}} \int_{h_{\text{П}}}^{h_s} \Delta H n(h) dh \right). \quad (40)$$

Если принять характер распределения запасенной энергии по высоте единичного объема линейным, получим выражение максимальной работы пластической деформации, которую необходимо подвести к единице поверхности, чтобы обеспечить эффективную с точки зрения повышения эксплуатационных свойств пластическую деформацию ПС:

$$W_{\text{ПД}(P,t)}^* = 0,5h_s \left(+ K_{T,\text{П}} \int \Delta H \right). \quad (41)$$

Работа внешних сил, обеспечивающих ППД, затрачивается как на пластическую, так и на упругую деформацию ПС. Оценим удельную работу упругой деформации локального объема как

$$A_{\text{упр}} = \frac{\sigma_T^2}{2E}, \text{ где } \sigma_T - \text{предел текучести; } E - \text{модуль упругости.}$$

Выражение, характеризующее предельную работу внешних сил, приходящуюся на единицу поверхности, при подведении которой достигается наибольший эффект упрочнения в процессе ППД, будет иметь вид:

$$W^* = 0,5h_s \left[\left(+ K_{T,\text{П}} \int \Delta H \right) + \frac{\sigma_T^2}{2E} \right]. \quad (42)$$

По своей сути полученное выражение (42) является критериальным, поскольку на основе его может быть решен целый ряд оптимизационных задач, связанных как с обоснованием технологических режимов обработки конкретным методом ППД, так и



Технология машиностроения

с определением физико-механических характеристик ПС после ППД.

В результате исследований динамических методов, реализующих процесс ППД энергонесущей средой в виде массы твердых металлических инденторов (дробин), установлена обобщенная зависимость для расчета удельной энергии деформирования, подводимой к единице обрабатываемой поверхности в виде

$$W_c = \frac{mV^2}{2F_{п.к.}} \sum_{i=1}^{i=N} e^{-0,15(i-1)}, \quad (43)$$

где τ – масса инденторов энергонесущей среды; V – скорость инденторов; $F_{п.к.}$ – площадь пластического отпечатка, формируемого индентором на поверхности детали в первоначальный момент соударения (спроектированной на плоскость).

Приравняв выражение для расчета удельной энергии деформирования W_c энергонесущей среды за время τ соответствующее реализации числа циклов нагружения $i=N$, к выражению описывающему величину предельной работы W^* внешних сил, получим оптимизирующее уравнение энергетического баланса, позволяющее обосновать оптимальные условия обработки динамическими методами ППД, обеспечивающие, требуемые по условиям эксплуатации, характеристики качества ПС и эффективное повышение эксплуатационных свойств деталей.

Используя критерии эффективности упрочнения, предложены зависимости для оценки физико-механических характеристик поверхностного слоя формируемого в процессе обработки динамическими методами ППД таких как:

- микротвердость в виде

$$HV = \zeta \sqrt{\frac{H^*}{M}}; \quad (44)$$

- и глубины упрочненного поверхностного слоя

$$h(H) = 1,5 \frac{\sqrt{GD\sigma_T^2}}{\sqrt[4]{2E\zeta\sqrt{\frac{H^*}{M}}}}, \quad (45)$$

где $M = \frac{1}{6G} \left(\frac{0,067}{1,2 \times 10^{-3} + 6,47 \times 10^{-6} \times HV_o} \right)^2$, (46)

G – модуль сдвига, МПа,

HV_o – твердость металла в исходном (отожженном) состоя-



нии.

Об адекватности установленных на основе энергетического анализа процесса ППД выводов и зависимостей свидетельствуют результаты экспериментальных исследований.

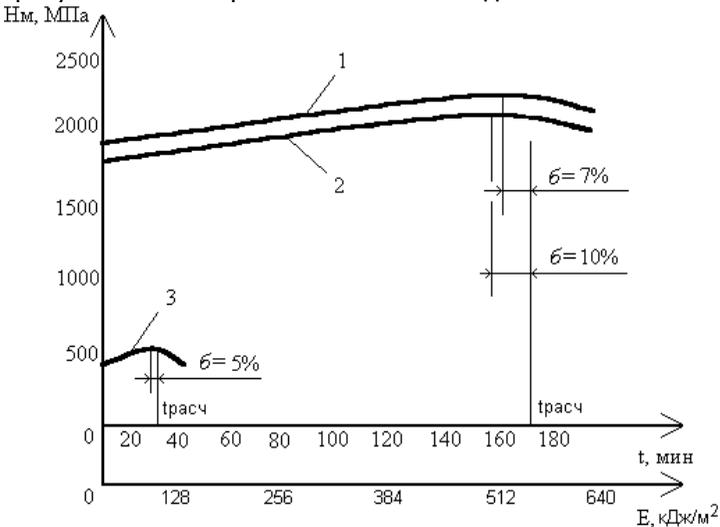


Рис.43. Прирост микротвердости на поверхности образца в зависимости от времени обработки и подводимой энергии деформирования.

1 – Сталь 40X; 2 – Сталь 20; 3 – АК6Т – 1.

$D=6$ мм; $A=3,5$ мм; $\gamma = 33$ Гц; $E_{уд} = 3.189$ кДж/м²мин



Технология машиностроения

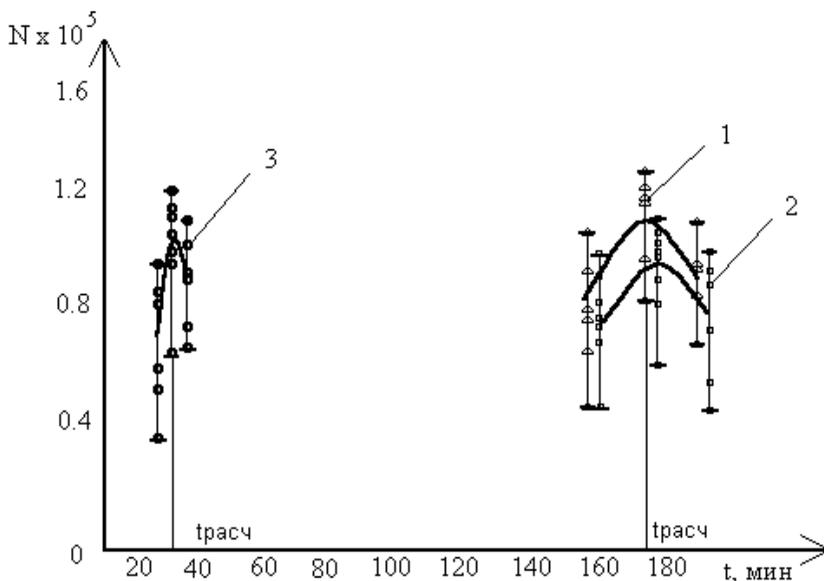


Рис.44. Долговечность образцов в зависимости от времени упрочнения.

- 1 – Сталь 40X, $\sigma_b = 200 \text{ МПа}$;
- 2 – Сталь 20, $\sigma_b = 200 \text{ МПа}$;
- 3 – АК6Т – 1, $\sigma_b = 180 \text{ МПа}$.

Так на рис.43 и 44 показано, что разница экспериментального и расчетного времени, за которое достигается наибольший эффект упрочнения деталей при виброударной обработке, находится в пределах 10%. Об этом же свидетельствуют результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений продолжительности упрочнения образцов из различных материалов в условиях вибрационной ударно-импульсной (ВиУО), гидродробеструйной (ГДУ), пневмодинамической (ПДУ) и дробетметной (ДМУ) обработок (табл.5).



Технология машиностроения

расчетных и экспериментальных значений продолжительности упрочнения образцов из различных материалов

Метод ППД	Материал	Удельная энергия, кДж/м ² мин	Время обработки до получения HVmax, мин.	Расчетное время обработки до получения HVmax, мин.	Погрешность расчетного значения, %.
ВиО	30Х3ВА	3.195	120	109	9.5
ВиО	ШХ-15, 40Х, Ст.45	3.515	180 130 160	108 134 164	40 3.5 2.5
ВиО	16ХЗНВФБ	2.347	90	88	2.5
ВиО	X12M, P18	5.073	60	62	3.3
ВиО	АВТ-1	1.63	45	51	12
ГДУ	12Х2НВФА	18	4	3.49	13
ГДУ	12Х2НВФА	12	6	6.16	6
ГДУ	16ХЗНВФБ	15	5	5.68	13.6
ДМУ ¹	12Х2Н4А	160	2	1.9	5
УМШ	25Н20	40	1	1.06	6

¹ Максимум контактной выносливости соответствует максимуму поверхностной микротвердости

2.3 оценка производительности динамических методов ППД

Наибольший эффект упрочнения детали методами ППД достигается, когда вся поверхность, намеченная для обработки после многократного ее нагружения, подвергается пластической деформации. При обработке динамическими методами соответствующий эффект обеспечивается при сплошном покрытии поверхности пластическими отпечатками, представляющими собой результат взаимодействия инструмента или инденторов обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью.

Характер распределения и интенсивность покрытия обрабатываемой поверхности следами пластической деформации (отпечатками) определяется энергетическими характеристиками инструмента или обрабатываемой среды, а также кинематикой процесса обработки, присущей конкретному динамическому методу ППД, которые в свою очередь зависят от:

- связи инденторов с источником энергии;
- количества инденторов в массе загрузки обрабатываемой среды и их кинетического состояния в процессе реализации метода ППД;



Технология машиностроения

- закономерностей движения инструмента или устройства относительно обрабатываемой детали (поверхности).

По связи инденторов с источником энергии динамические методы ППД подразделяются на две подгруппы (рис.1). Первая подгруппа объединяет методы ППД одно и многоинденторными инструментами основанных на полужесткой (гибкой) связи инденторов с источником энергии. К ним относятся: чеканка, виброконтактная обработка, обработка шариково – стержневым упрочнителем, центробежно-шариковая обработка механическими щетками.

При реализации этих методов инденторы получают ударные импульсы или от специально предусмотренных для этой цели в конструкции инструмента виброударных систем, или в процессе центробежно – инерционных сил, развиваемых инструментами вращательного типа (щетками, центробежно – шариковые обкатники). Сила соударения регулируется энергетическими возможностями источников ударных импульсов, а также величиной натяга.

В результате обработки одно и многоинденторными инструментами, имеющими строго детерминированную схему расположения инденторов и в силу жесткой кинематики процесса, обеспечивающей регулярное наложение дискретных углублений на поверхности образуются регулярные микрорельефы. Параметры микрорельефа регулируются использованием инденторов соответствующего диаметра и формы их рабочей части, а также продольной подачей инструмента и частотой вращения детали (для тел вращения) или поперечной подачей (для плоских деталей).

Отличительной особенностью второй подгруппы динамических методов ППД является обработка деталей свободно движущимися инденторами или в условиях направленного энергетического потока инденторов, или в условиях импульсивно выбрасываемых порционных масс инденторов, или в условиях замкнутых объемов, совершающих колебательные или вращательные движения.

К методам ППД, реализующим обработку свободно движущимися инденторами в условиях направленного энергетического потока относят дробеструйную, гидродробеструйную обработки.

Обработка деталей в условиях импульсивно выбрасываемых порционных масс характерна для таких методов ППД, как гравитационная, дробеметная, ударно-импульсная, ударно-барабанная обработок.

В замкнутых объемах путем взаимного соударения инденторов осуществляется виброударная, ультразвуковая и пневмодинами-



ческая обработка.

Процесс формирования и распределения на обрабатываемой поверхности пластических отпечатков при обработке свободнодвижущимися инденторами из-за отсутствия жесткой связи с источником энергии носит случайный стохастический характер. В силу этих обстоятельств он может быть описан на основе теоретико-вероятностных представлений. В общем виде теоретико-вероятностная модель интенсивности покрытия обрабатываемой поверхности пятнами контакта (пластическими отпечатками) при обработке динамическими методами ППД свободно-движущимися инденторами может быть представлена следующим образом:

$$P = P_{\mathcal{E}} P_G, \quad (47)$$

где P – вероятность того, что любая точка обрабатываемой поверхности покрывается пятном контакта за один энергоимпульс, сообщаемый обрабатывающей среде;

$P_{\mathcal{E}}$ – энергетическая вероятность того, что за один энергоимпульс обработки образуется пятно контакта.

P_G – геометрическая вероятность того, что любая точка внутри обрабатываемой поверхности покрывается пятнами контакта;

За пятно контакта, как правило, принимается площадь круга $F_{н.к.}$, радиусом a_{cp} , получаемого на плоской поверхности при обработке их сферическими инденторами с радиусом рабочей части R . Для более точных расчетов формы и размеров пятен контакта может быть уточнена с учетом кривизны обрабатываемых поверхностей, угла соударений индентора и количества слоев порционной массы инденторов, соударяемой с обрабатываемой поверхностью.

Последнее обстоятельство характерно для методов ППД порционными массами и в виброкамерах, реализующих обработку по схеме столбика шариков, для которых площадь пятна контакта должна быть скорректирована с учетом коэффициента пропорциональности K , учитывающего погашение ударного импульса в столбике состоящего из m инденторов в виде:



Технология машиностроения

$$F_{П.К.} = \pi a_{cp}^2 \left[\frac{K - \left(\frac{1}{K}\right)^{m-1}}{K - 1} \right] \quad (48)$$

Геометрическая вероятность определяют как произведение:

$$P_{\Gamma} = P_{\Gamma_1} \cdot P_{\Gamma_2}, \quad (49)$$

где P_{Γ_1} – геометрическая вероятность того, что любая точка внутри единичной упаковки покрывается пятном контакта;

P_{Γ_2} – геометрическая вероятность того, что любая единичная упаковка, выделенная внутри обрабатываемой поверхности покрывается пятном контакта.

Под единичной упаковкой понимается геометрическая фигура, образованная центрами соприкасающихся инденторов в момент получения ими энергетического импульса и спроектированная на обрабатываемую площадь. Исследования динамических методов показывают, что наиболее вероятными формами единичных упаковок являются треугольник, квадрат. Для практических расчетов P_{Γ_1} принимают отношение площади пятна контакта

$F_{П.К.}$ к площади выбранной формы единичной упаковки F_{yn} , образованной инденторами с радиусом R .

$$P_{\Gamma_1} = \frac{F_{П.К.}}{F_{yn}} \quad (50)$$

Геометрическая вероятность того, что любая единичная упаковка, выделенная внутри обрабатываемой поверхности, покрывается пятном контакта, характеризуется величиной соотношения

$$P_{\Gamma_2} = \frac{S_{p.c.}}{S_{обп}}, \quad (51)$$

где $S_{p.c.}$ – количество (площадь) упаковок формируемых соприкасающимися инденторами в исходном состоянии, соответствующего моменту сообщения им энергоимпульса.



Технология машиностроения

Для облегчения вычислений эту формулу с помощью нормирующего множителя $t = \frac{d - m_d}{\sigma_d}$ приведем к виду:

$$P(d_1 < d < d_2) = \Phi\left(\frac{d_2 - m_d}{\sigma_d}\right) - \Phi\left(\frac{d_1 - m_d}{\sigma_d}\right), \quad (53)$$

где $\Phi\left(\frac{t}{\sigma_d}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – нормированная функция Лапласа, значения которой для различных $t = \frac{d - m_d}{\sigma_d}$ находят по таблицам, именуемых «Значения функций Лапласа».

Многочисленные исследования показывают, что практическая зона рассеяния случайной величины x , подчиняющейся закону нормального распределения, лежит в пределах $m_x \pm 3\sigma_x$ и составляет $6\sigma_x$. Тогда, при минимальном размере следа удара формируемого на поверхности инденторами со скоростью соударения V_{\min} и равным $d_{\min} = m_d - 3\sigma_d$. И максимального размера следа удара, формируемого индентором на поверхности в результате его многократного соударения равном $d_{\max} = m_d + 3\sigma_d$ значения t_1 и t_2 составят:

$$t_1 = \frac{d_{\min} - m_d}{\sigma_d} = \frac{m_d - 3\sigma_d - m_d}{\sigma_d} = -3 \quad (54)$$

$$t_2 = \frac{d_{\max} - m_d}{\sigma_d} = \frac{m_d + 3\sigma_d - m_d}{\sigma_d} = 3 \quad (55)$$

Следовательно

$$P(m_d - 3\sigma_d < d < m_d + 3\sigma_d) = \Phi(3) - \Phi(-3) = \Phi(3) - \Phi(-3) = 2\Phi(3) \quad (56)$$

Согласно таблицам, содержащим значения функций Лапласа $2\Phi(3) = 0,9973$. Это означает, что вероятность нахождения случайной величины d внутри обозначенного интервала $d_{\min} - d_{\max}$ очень высока.

Экспериментальные исследования, проведенные по оценке появления отпечатка на обрабатываемой поверхности при различных методах ППД подтвердили правомерность предложенного подхода к оценке P_s (определен $P_s = 0,95$).

Предполагая, что при всех импульсах в процессе обработ-



Технология машиностроения

ки следы пятен контакта формируемые на обрабатываемой поверхности за один импульс не перекрываются. Используя формулу Бернулли можно определить вероятность того, что каждая точка обрабатываемой поверхности покроется отпечатками x раз за n энергетических импульсов сообщенных рабочей среде

$$P_n^{(x)} = \frac{n!}{(n-x)!x!} P^x (1-P)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad (57)$$

Зависимость $(P_n^{(x)} = \frac{n!}{(n-x)!x!} P^x (1-P)^{n-x})$ позволяет

вычислить количество импульсов, обеспечивающих X -кратное покрытие поверхности следами ударов. Однако этот процесс очень громоздкий.

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложена упрощенная зависимость для расчета количества энергетических импульсов в виде:

$$n \approx \frac{x}{P}$$

Оценив для конкретного метода ППД свободнодвижущимися инденторами, продолжительность единичного импульса t_0 в функции от технологических режимов, технологическое время упрочнения обрабатываемой поверхности составит

$$T_{обп} = t_0 n \quad (58)$$

Так, например, для методов виброударной обработки учитывая, что $t_0 = \frac{1}{f_0}$, где f_0 – частота колебаний, время обработки будет равно:

$$T_{обп} = \frac{i}{P f_0} \quad (59)$$



3 Повышение эффективности динамических методов ППД на основе моделирования динамических характеристик процесса (на примере виброударной обработки)

Важнейшим фактором, определяющим интенсивность процесса ППД и, следовательно, производительность операций упрочнения динамическими методами, является динамическое состояние обрабатываемой среды. В этой связи разработка методов моделирования и проектирования, эффективных по производительности технологических систем и средств их технологического оснащения является основной задачей при разработке операций упрочнения ППД. Решение этой задачи рассмотрим на примере моделирования наиболее распространенного в машиностроительной практике метода упрочняющей обработки ППД – виброударного упрочнения. Технологическая обработка этим методом может осуществляться как на вибростанках, создающим циркуляцию обрабатываемой среды, так и на вибростанках с возвратно-поступательным движением среды (рис.45).

Однако как свидетельствует производственная практика наибольший эффект от применения виброударного упрочнения достигается когда эту технологическую операцию выполняют на станках с возвратно-поступательным движением среды, у которых масса обрабатываемой среды в виде металлических сферических инденторов в один полупериод колебаний отбрасывается на поверхность детали, в другой полупериод отскочившие от детали инденторы возвращаются к активной стенке камеры (рис.45 б).

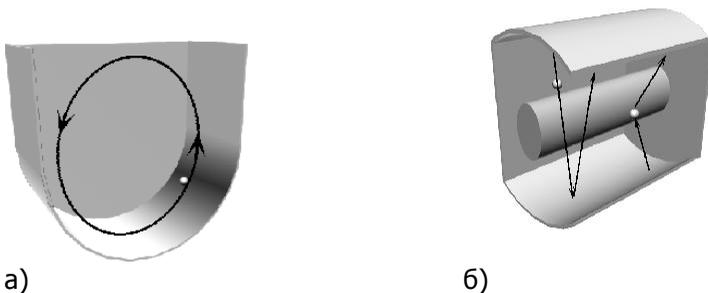


Рис.45. Схема движения инденторов обрабатываемой среды в камерах с циркуляцией по эллипсу (а) и возвратно-поступательным движением (б)



Технология машиностроения

Такая обработка реализуется, например, при виброупрочнении лонжерона лопасти вертолета (рис.46) на станке с однокоординатной вибрацией, возбуждаемой парой движущихся навстречу дебалансных вибраторов. Амплитуда колебаний в подобных станках обычно назначается равной 10-25 мм на частоте 15-25 Гц.

Известная конструкция эксцентрикового вибростанка (рис.47), предназначенная для периодического метания инденторов обрабатываемой среды с высокой амплитудой, также характеризуется исключительно высоким уровнем вибраций. Работая на частотах 10-20 Гц при амплитуде 10-40 мм, станок создает движение среды, при котором она перемещается от нижнего до верхнего дна по криволинейным отрезкам, образующим замкнутый многоугольник (рис.47).

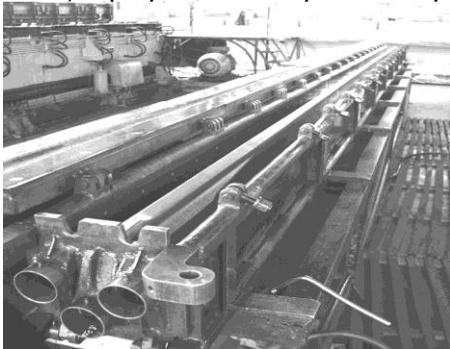


Рис.46. Станок для виброупрочнения лонжерона лопасти вертолета.

Крышка камеры откинута; видна схема крепления лонжерона к стенкам камеры и отверстия для загрузки-выгрузки стальных шариков

Таким образом, главной особенностью вибростанков для поверхностного упрочнения является высокая амплитуда колебаний их рабочей камеры при сравнительно невысокой частоте. На первый взгляд добиться той же скорости движения частиц среды (а большие ударные силы достигаются именно благодаря высокой скорости) можно путем увеличения частоты в соответствии с известным соотношением для амплитуды виброскорости

$$v_a = 2\pi fA. \quad (60)$$

Это позволило бы значительно улучшить экологические характеристики процесса, т.к. схемы виброзащиты от высокоамплитудных низкочастотных шума и вибрации весьма сложны и дорогостоящи. Поэтому при проектировании операций ППД этим методом очень важно определить то оптимальное соотношение между амплитудой и частотой, при котором удастся достичь требуемых высоких скоростей частиц массы загрузки, понизив амплитуду колебаний.



Технология машиностроения

Сделать это возможно на основе модельного описания технологического процесса, которое включало бы в себя основные явления, происходящие при обработке.

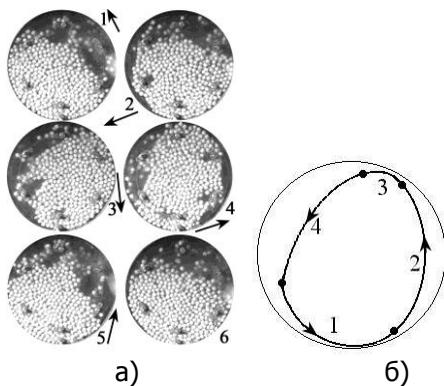


Рис.47. Движение массы загрузки в высокоамплитудном эксцентриковом вибростанке а) кинограмма движения за 1 период колебаний; б) траектория центра масс.

Как отмечалось выше, станки для виброударной упрочняющей обработки обычно построены по схемам, согласно которым обрабатываемая среда либо совершает циркуляционное движение вместе с деталями, либо всем массивом движется возвратно-поступательно вверх-вниз, нанося удары по поверхности детали при изменении направления своего движения. При этом деталь может быть прикреплена как к неподвижному основанию, так и к камере, совершая колебательное движение вместе с ней. При более распространенной, второй схеме часть периода колебаний подброшенный основанием массив инденторов движется под действием силы тяжести вверх, а часть периода – вниз. Относительно меньшую часть периода массив инденторов находится под действием сил соударения с верхним и нижним основаниями. Как минимум, одно из этих оснований является поверхностью детали (рис.48).



Технология машиностроения

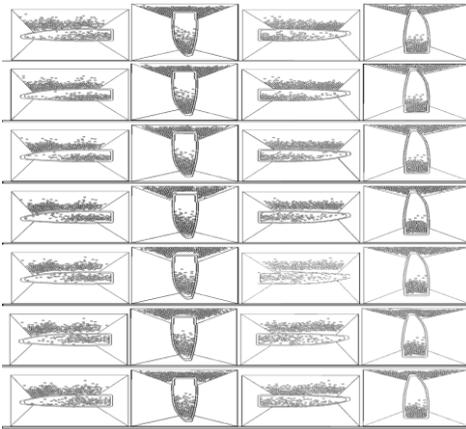


Рис.48. Схема движения массы загрузки инденторов в течение одного периода колебаний вибростанка при упрочнении лонжерона лопасти вертолета

Кроме того, необходимо отметить установленный опытным путем факт, заключающийся в том, что при высокоамплитудной виброударной обработке более эффективен процесс ППД с малым объемом обрабатывающей среды. В этом состоит отличие высокоамплитудного процесса от процесса с циркулирующей среды. Причины того, что на практике более эффективны высокоамплитудные станки с разреженной массой загрузки, вытекает из теории виброударных систем.

Виброударная система (ВУС) обычно состоит из одной или нескольких ударных пар – масс, периодически взаимодействующих друг с другом. Если движение в системе возбуждается колебаниями одной из масс, например, по закону

$$X_i = \sin(\omega t + \phi), \quad (61)$$

в системе могут возникнуть стационарные виброударные колебания с частотой, равной или в целое число раз меньшей, чем ω . В последнем случае режим виброударных колебаний называют кратным. Особенностью виброударных систем является наличие не обязательно одного, а, возможно, нескольких стационарных режимов разной кратности. В результате исследований Я.Г. Пановко установил, что период устойчивых стационарных колебаний системы мало зависит от характера соударения звеньев, т.к. имеющиеся силы трения стабилизируют их движение. Результатом описания движения элементов ВУС является фазовое уравнение, которое практически всегда при гармоническом возбуждении типа (61) приводится к виду

$$w_1 \sin\phi + w_2 \cos\phi = w_3, \quad (62)$$



где W_1, W_2, W_3 - функции параметров системы и возбуждения, а ϕ - фаза колебаний возбуждающего элемента, при которой происходит его соударение с соседним звеном.

Из исследованных в настоящее время 3 десятков моделей виброударных систем, рассмотрим модель «столбика шариков» (рис.49).

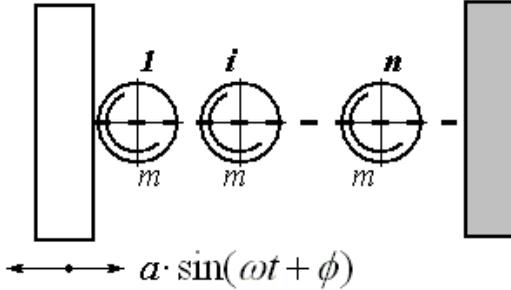


Рис.49. Модель виброударной системы – «столбик шариков»

Эта модель обстоятельно исследована; ее особенности описывают следующие соотношения:

Уравнения движения инденторов в промежутках между соударениями

$$m\ddot{x}_i = 0; \quad 1 \leq i \leq n. \quad (63)$$

Коэффициенты фазового уравнения:

$$w_1 = 1; \quad w_2 = \frac{2}{3}\pi l \left(\frac{1+R+R^2}{1-R} - \frac{1-R}{1+R} n^2 \right); \quad w_3 = \frac{S}{a}, \quad (64)$$

где R – коэффициент восстановления, одинаковый для всех ударных пар, l – кратность режима, n – число инденторов в столбике, S – суммарный зазор в системе; a – амплитуда колебаний ударника. Ударный импульс, передаваемый преграде:

$$I = \frac{m\omega a}{n} \cdot \frac{1+R}{1-R} \cos \phi. \quad (65)$$

Стационарные виброударные колебания могут существовать при выполнении условия, представляющего собой критерий эффективной загрузки обрабатываемой среды в рабочую камеру



$$n < \frac{1}{1 - R} \quad (66)$$

Из (65) видно затухание ударного импульса по мере его прохождения вдоль цепочки инденторов. Для стальных сферических инденторов среднее значение коэффициента восстановления составляет около 0,7. Таким образом, при условии оптимальности момента соударения ($\cos\phi = 1$) ударный импульс затухает обратно пропорционально числу слоев инденторов. Рост ударного импульса наблюдается с увеличением амплитуды виброскорости (равной ωa) и массы инденторов. Виброударные колебания полностью затухают при нарушении условия (66), т.е. при $n \geq 1 / (1 - 0,7) \approx 3 \dots 4$. Это не означает, что в такой системе энергия вообще не будет передаваться преграде. Однако процесс при этом будет носить нестационарный, хаотический характер, и большая часть приходящих ударов будет передавать импульс, существенно меньший, чем в (65).

Однако рассматриваемая модель ВУС будет не полной если в ней не будут учтены силы тяжести. Неучет сил тяжести при анализе движения инденторов обрабатываемой среды в высокоамплитудном вибростанке может привести к совершенно неправильным выводам – сила тяжести оказывает влияние на возвратное движение инденторов вниз. В связи с тем, что как следует из рис.48, воздействие на деталь производится двумя – тремя упакованными слоями инденторов, основные черты процесса можно выявить при анализе одномассных модельных ВУС. Схемы этих ВУС должны отвечать известным и применяемым на практике схемам процессов высокоамплитудной виброударной обработки ППД, среди которых можно выделить следующие четыре, изображенные на рис.50.



Технология машиностроения

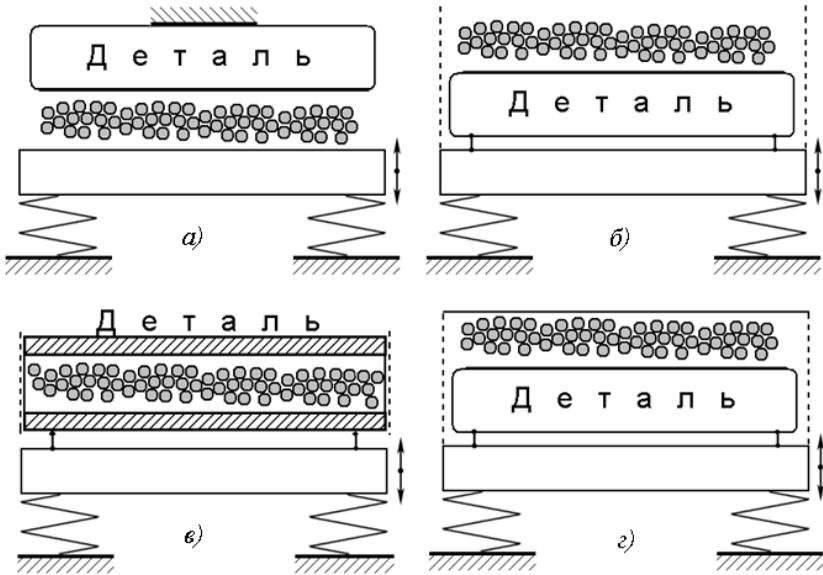


Рис.50. Основные технологические схемы высокоамплитудной виброударной упрочняющей обработки

а) обработка нижней поверхности неподвижной детали; б, г) деталь прикрепленная к виброплите подбрасывает массу загрузки, б) движение массы загрузки не ограничено сверху; г) движение массы загрузки ограничено сверху отражающей крышкой; в) упрочнение внутренней полости детали, прикрепленной к виброплите (деталь - виброкамера)

Рассмотрим схему виброударной высокоамплитудной обработки, при которой обрабатываемая деталь неподвижна. Основываясь на простейшей схеме процесса, приведенной на рис.51 (аналог схемы на рис.50.а), выявим минимальный набор параметров, позволяющий связать амплитудно-частотные характеристики возбуждающего воздействия, размер и массу инденторов, а также свойства обрабатываемой поверхности. В рассматриваемой модели движение обрабатывающей среды возбуждается нижней плитой.

После столкновения с нижней вибрирующей платформой отскочивший индентор совершает свободный полет до встречи с верхней плитой. Провзаимодействовав с верхней плитой, индентор получает импульс отдачи, направленный вниз. После чего ускоренно под действием силы тяжести движется вниз. Согласно стандартной классификации виброударных систем (ВУС) эта модель является одномассовой [3], она похожа на известную



Технология машиностроения

модель «прыгающий шарик», но отличается от нее наличием неподвижной верхней преграды с бесконечной массой.

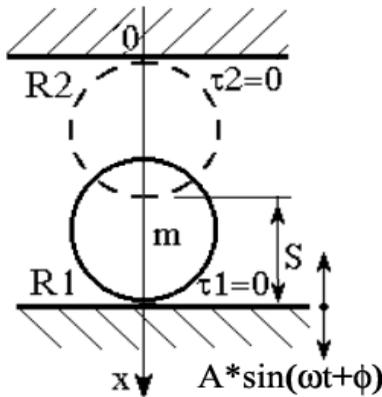


Рис.51. Схема виброударной системы, моделирующей упругие удары закрепленной детали

Несмотря на то, что наличие трения моделью не учитывается ее решение позволяет выяснить вопрос существования тех или иных виброударных режимов, и может служить средством тестирования программ для ЭВМ, которыми возможно учесть большинство явлений и факторов процесса. Упрощающие предположения, свойственные модели, полагают, что реальная система представляет собой большую совокупность систем (рис.51), в которой инденторы располагаются в ряд по горизонтали и синхронно движутся вверх – вниз:

- динамическое возбуждающее воздействие является гармоническим (синусоидальным) с амплитудой A , частотой ω и начальной фазой ϕ , отсчитываемой от момента соударения колеблющейся нижней плиты с индентором, который мы принимаем за начало отсчета времени.
- продолжительность соударений обоих типов принимается равной нулю.
- трение инденторов в друг с другом и о стенки отсутствует, – потери энергии в системе имеют место только при соударениях тел и описываются коэффициентами восстановления R_1 и R_2 в обоих ударных парах.
- распределенный в реальном вибростанке между звеньями ВУС зазор заменяется суммарным зазором S . Зазор отсчитывается от положения индентора массой m , в котором он касается верхней плиты до



Технология машиностроения

равновесного положения нижней плиты.

- массы верхней и нижней плит приняты бесконечно большими.

Таким образом, сама структура принятой модели и введенные упрощения определяют перечень параметров, управляющих процессом. Адекватность принятой модели может быть оценена после выявления ее способности отражать установленные экспериментально реальные процессы в вибростанке.

Начало координат X^* совместим с верхней плоскостью (далее называемой преградой); координату точки соударения индентора с ударником обозначим X_c^* . Обозначим частоту вибрации нижней плиты (называемой далее ударником) – ω , а частоту установившихся вынужденных колебаний ВУС –

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}, \text{ тогда кратность режима } l = \frac{\omega}{\omega_s} \text{ есть натуральное число.}$$

Проанализируем движение массы m .

Так как в промежутках между соударениями масса m движется свободно, период движения виброударной системы складывается из времени t_1 движения от ударника к преграде, которое находится из очевидного соотношения:

$$X^* = X_c^* - V_1 t + \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t_1 = \frac{V_1}{g} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2gX_c^*}{V_1^2}} \right] \quad (67)$$

и из времени обратного движения вниз от преграды навстречу ударнику:

$$X^* = 0 + V_2 t + \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t_2 = \frac{V_2}{g} \left[\sqrt{1 + \frac{2gX_c^*}{V_2^2}} - 1 \right]. \quad (68)$$

Здесь символами V_1, V_2 обозначены скорости индентора после удара соответственно об ударник и преграду. Они связаны с доударными скоростями U_1, U_2 через коэффициенты восстановления:

$$V_2 = -R_2 U_2; V_1 = u_c^* - R_1 (U_1 - u_c^*) \quad (69)$$



где

$$u_c^* = \frac{d}{dt} X_c \Big|_{t=0} = \frac{d}{dt} \left[-A \sin(\omega t + \phi) \right]_{t=0} = -A \omega \cos(\omega t + \phi) \Big|_{t=0} = -A \omega \cos(\phi) \quad (70)$$

– скорость ударника в момент соударения.

Из неотрицательности подкоренного выражения в (67) следует неравенство

$$\frac{2gX_c^*}{V_1^2} \leq 1 \Rightarrow V_1 \geq \sqrt{2gX_c^*}, \quad (71)$$

нарушение которого означает, что масса m не долетает до преграды. В этом случае виброударная система будет отличаться от изображенной на рис.49 отсутствием преграды.

Из (67), (68) период виброударных колебаний будет равен

$$T_s = t_1 + t_2 = \frac{1}{g} \left[\sqrt{V_1^2 - 2gX_c^*} + \sqrt{V_2^2 + 2gX_c^*} - \sqrt{V_1^2 - 2gX_c^*} \right] \frac{2\pi}{\omega}. \quad (72)$$

Стандартная процедура исследования ВУС состоит в определении 4-х скоростей U_1, U_2, V_1, V_2 из системы 4-х уравнений (69), (70), (72). Однако, наличие силы тяжести не позволяет выразить эти скорости в виде линейных функций частоты и координаты точки соударения. Соотношения становятся громоздкими и теряют наглядность. В связи с этим, а также с желательностью учета конечности времени соударения, используем вместо стандартной процедуры исследования ВУС метод прямого численного моделирования [13]. Этот метод позволяет учесть многие черты процесса, чего не дают стандартные методы, однако требует больших затрат времени для машинного счета. Кроме того, для его использования необходимо принять некоторую гипотезу о модели ударного контактного взаимодействия звеньев ВУС.

В качестве такой была принята модель Герца – Кувабара – Коно. Согласно модели Герца – Кувабара – Коно, нормальная сила, действующая между двумя взаимодействующими поверхностями:

$$\bar{F}_n = \sqrt{\Delta} \cdot \left[k \cdot \Delta + k_2 \cdot u_n \right] \bar{n}. \quad (73)$$

В формуле (73): $u_n = \left[\bar{u}_2 - \bar{u}_1 \right] \bar{n}$ – нормальная компо-



Технология машиностроения

нента скорости сближения поверхностей тел вдоль вектора нормали \bar{n} ; Δ – перекрытие контактирующих тел;

k – коэффициент жесткости контакта для тел из различных материалов:

$$k = \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot (R_1 + R_2)}} \quad (74)$$

Коэффициент $\delta_i = \frac{1 - \mu_i^2}{\pi E_i}$ характеризует материал кон-

тактирующего тела, μ_i – коэффициент Пуассона, E_i – модуль Юнга.

Удельный диссипативный коэффициент k_{2mat} , специфический для каждой пары материалов согласно соотношению

$$k_2 = k_{2mat} \cdot \sqrt{\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}} \quad (75)$$

Значения коэффициента k_{2mat} для описания взаимодействия частиц, выполненных из различных материалов, приведены в табл.6.

Т а б л и ц а 6 – Значения коэффициентов диссипативного и восстановления k_{2mat}/R для ударных пар из различных материалов [13]



Технология машиностроения

Материал ударника	Материал контртела					
	стали Ст3	АВТ	резине		полиуретану	
			сухой	увлажн.	сухому	увлажн.
Закаленная сталь по...	$1,1 \cdot 10^6$ 0,64-0,7	$0,85 \cdot 10^6$ 0,63- 0,67	$0,63 \cdot 10^4$ 0,66- 0,68	$0,55 \cdot 10^4$ 0,69-0,7	$1,25 \cdot 10^4$ 0,54- 0,57	$1,05 \cdot 10^4$ 0,58- 0,61

Естественно, при изменении характеристик твердости, наличии технологической жидкости в зоне контакта могут меняться приведенные выше значения, однако для установления основных закономерностей процесса в высокоамплитудном вибростанке эти значения могут дать надежную основу.

Используя диссипативную модель столкновения (75) вместе с параметрами материалов, определяемыми (73), (74) и табл.6, можно корректно выполнить численное моделирование ВУС, представленной на рис.51. Как правило, при отыскании режимов работы ВУС варьируют величиной зазора, частотой, амплитудой и коэффициентом восстановления в ударных парах. Для решения нашей конкретной задачи целесообразно ограничиться следующими диапазонами вариации управляющих параметров:

1. Частота – 10...50 Гц, шаг изменения 5 Гц.
2. Амплитуда – 5...30 мм, шаг изменения 5 мм.
3. Зазор – 5...50 мм, шаг изменения 5 мм.
4. Материалы ударника и препятствия – «сталь-сталь», «сталь-алюминиевый сплав», «сталь-полиуретан», «алюминиевый сплав-полиуретан». Шарик всегда выполнен из закаленной стали, имеет диаметр 5 мм.

Начальными условиями при моделировании исследуемой ВУС всегда принимались такие, при которых начальная скорость шарика равнялась нулю, а исходная координата равнялась $0,1S$; $0,4S$; $0,7S$; $0,9S$. Если при всех четырех начальных условиях процесс выходил на один и тот же стационарный режим, то полагали, что этот режим единственный. В противном случае дополнительно исследовали условия возбуждения конкурирующего режима.

В связи с тем, что дифференциальные уравнения движения виброударной системы



$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} [F_{y\delta}^* - F_{np}^*] - g, \end{cases} \quad (76)$$

и начальные условия, определенные схемой обработки

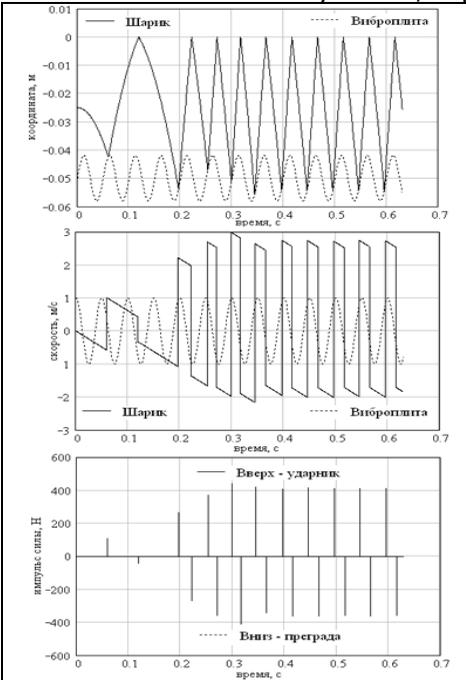


Рис.52. Временные диаграммы установления стационарных виброударных колебаний в системе (рис.51)

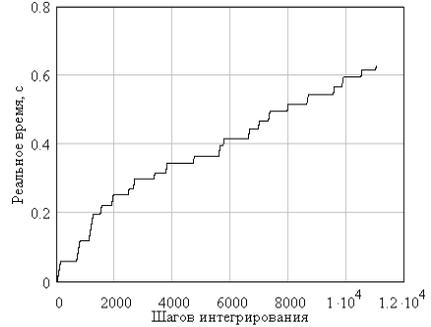


Рис.53. Диаграмма, иллюстрирующая автоматическое изменение шага при интегрировании уравнений системы (рис.52)

(Горизонтальные участки соответствуют замедлению интегрирования в процессе контактирования шарика с ударником и преградой, вертикальные – интегрирование с большим шагом при свободном полете шарика)

$$x_{y\delta}(t) = S \cdot A \sin \omega t$$

$$x_{np} = 0$$

$$A \sin \omega t$$

для схемы рис.50.a

$$x_{y\delta}(t) = S \cdot A \sin \omega t$$

$$x_{np} = -$$

для схемы рис.50.в

где $F_{y\delta}^*$ и F_{np}^* – силы (76), действующие на индентор при контакте соответственно с ударником и пре-



Технология машиностроения

градой, m – приведенная масса столбика инденторов, g – ускорение свободного падения, являются жесткими, т.е. такими, в которых возбуждающее воздействие имеет две сильно различающиеся постоянные времени (процесс соударения очень быстрый, процесс свободного полета значительно медленнее), для их интегрирования был разработан специальный алгоритм с переменным шагом. Интегрирование выполнялось пошагово методом Рунге-Кутты 4-5 порядка точности. При свободном движении, когда на индентор действовала только сила тяжести, – с шагом 0,001 сек, при столкновениях – непрерывным интегрированием с шагом 2 мксек до прекращения контакта. Типичные временные диаграммы, получаемые при исследовании каждого режима ВУС, представлены на рис.52, график зависимости реального времени процесса в зависимости от машинного времени, характеризующий процесс интегрирования, на рис.53.

Стальной сферический индентор диаметром 5 мм, отпущенный из начального положения $x_0 = -0,025$ м падает на стальную виброплиту, колеблющуюся с амплитудой 8 мм и частотой 20 Гц, от которой отскакивает вверх к неподвижной стальной преграде ($x_{пр} = 0$)

Очевидно, при больших зазорах в ВУС из схемы (рис.51) исключается верхняя преграда, т.к. индентор не долетает до нее, возвращаясь вниз под действием силы тяжести. Эта схема, наиболее простая, аналогична изображенной на рис.50.б. В качестве примера на рис.54 приведены диаграммы изменения координаты, скорости и ударных сил, действующих на индентор.

Анализ диаграмм показывает, что при заданных условиях (частота и амплитуда) имеет место режим кратных виброударных колебаний (\neq). Это означает, что один удар по поверхности детали наносится за время, равное \neq периодам колебаний виброплиты. Таким образом, значительную часть времени обработки масса загрузки инденторов пребывает в свободном движении, не совершая полезной работы. Чем больше кратность режима, тем хуже используется машинное время вибрационного станка. С другой стороны, из соотношения $l = \omega / \omega_s$ следует, что в спектре шума и вибраций, создаваемых вибрационным станком, появляется значительно более низкая частота ω_s виброударных колебаний, что существенно затрудняет проведение мероприятий по снижению шу-

мо – и виброактивности технологического процесса. Из производственного опыта известно, что при кратности режима, большей двух, работа вибростанка становится неэффективной, а экологические характеристики - неудовлетворительными. Поэтому области амплитуд и частот, соответствующие $l > 2$ везде ниже обозначаются как неприемлемые. Очевидно, приведенные соображения верны для всех изображенных выше на рис.50 виброударных систем. Поэтому они могут применяться для оценки эффективности всех разновидностей технологических схем виброударной обработки.

Для системы (рис.50.б) на рис.55 приведены зависимости кратности режима и скоростей соударения частиц среды с виброплитой (деталью) от амплитуды и частоты вибрации при установившихся виброударных колебаниях. Аналогичные диаграммы для сил соударения не даются, так как требуют привлечения моделей упругопластического поведения материала упрочняемой детали. Данные по скорости частиц значительно более надежны потому, что основаны на экспериментально проверенных значениях коэффициентов восстановления.

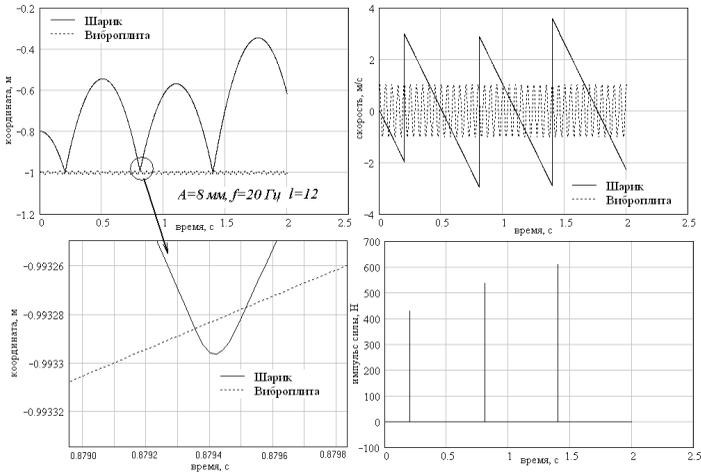


Рис.54. Временные диаграммы виброударных колебаний с кратностью $l=12$ в системе «стальной шарик на стальной виброплите». Слева внизу акт соударения развернут во времени

Результаты, представленные на рис.55 кажутся на первый взгляд противоречащими опыту. Во-первых, скорость частиц при соударении с виброплитой не зависит



Технология машиностроения

от амплитуды колебаний. Во-вторых, эта скорость снижается с ростом частоты вибрации f как C/f , где коэффициент C зависит только от кратности режима. В действительности, приведенные зависимости правильно описывают характер процесса, т.к. речь идет о стационарных колебаниях, при которых движение среды вверх не ограничено. Период таких колебаний определяется временем свободного полета среды, т.е. ее скоростью отскока. Но для того, чтобы вновь столкнуться с виброплитой точно через время, равное периоду колебаний плиты, скорость отскока среды должна быть согласована со скоростью плиты в момент соударения и периодом ее колебаний. Таким образом, чем выше частота вибрации, тем быстрее должна возвратиться среда после полета и, естественно, тем меньше должна быть ее скорость отскока от плиты. С увеличением кратности режима (на рис.55 приведены кривые для $l=1, 2$) скорость отскока возрастает, но количество ударов в единицу времени падает. Так, при одних и тех же амплитуде и частоте скорость соударения для $l=2$ в два раза больше, чем для $l=1$. Но увеличение силы удара в два раза сопровождается двукратным уменьшением числа этих ударов, наносимых в единицу времени.

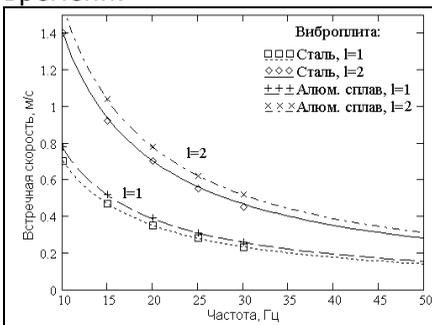


Рис.55. Зависимость скорости соударения инденторов обрабатываемой среды с поверхностью виброплиты от частоты и кратности режима стационарных виброударных колебаний (точки получены решением системы фазовых уравнений, кривые – модель $v=C(l)/f$)

Еще одной особенностью полученных результатов является характер зависимости скоростей соударения от коэффициента восстановления материала вибрирующей плиты. Чем меньше коэффициент восстановления (большая пластичность и вязкость) материала, тем выше развиваются скорости соударения в стационарном режиме. Это объясняется зависимостью времени в полете, получаемой из элементарных выкладок



Технология машиностроения

$$t(\phi) = \frac{2A\omega \cos(\phi)}{g} \cdot \frac{R}{1-R} = \frac{2\pi l}{\omega} \quad (77)$$

Отметим еще раз, что наибольший интерес с точки зрения технологии упрочняющей обработки ППД представляют именно стационарные виброударные режимы колебаний с малой кратностью, т.к. при больших амплитудах и силах соударения хаотические движения частиц среды могут создавать большую неравномерность диаметров пластических отпечатков и глубины наклепа, а также приводить к значительному увеличению потребного для обеспечения заданного качества времени обработки. Кроме того, виброударные системы при наличии диссипативных сил всегда стремятся перейти в режим стационарных колебаний, если такой режим реализуем для заданных параметров возбуждения и конструктивных параметров системы.

Следующей исследованной схемой обработки была схема (рис.50.а), которой соответствовала ВУС (рис.51). Типичные временные диаграммы установления стационарных колебаний даны на рис.52. Основные отличительные особенности этой схемы состояли в следующем. Во-первых, при увеличении зазора скорости отскока может быть недостаточно для достижения преграды. Тогда схема переходит в ранее рассмотренную. Эти случаи представлены на рис.56 затемненными областями. Размер таких областей (неэффективной работы!) зависит от зазора S в системе и амплитуды колебаний. Начиная с некоторой пороговой зависящей от зазора, амплитуды система переходит в нормальный режим работы. Дальнейшее увеличение амплитуды никак не влияет на рост скоростей соударения – при фиксированном зазоре и амплитуде вибраций скорость соударений можно увеличить, только наращивая частоту. Закон изменения скорости с ростом частоты практически линейный.

Значительный интерес представляет обусловленность скоростей соударения от величины зазора в системе, что также иллюстрируется рис.56. С ростом зазора увеличивается достигаемая скорость соударения, но сужается область допустимых амплитуд, уходя в область более интенсивных колебаний.

Характерно, что в данной системе кратные режимы с целым / вообще не реализуются, т.е. невозможны движения, при которых соударение шарика (среды) с виб-



Технология машиностроения

роплитой происходит реже, чем один раз за период колебаний. Поэтому на рис.56 даны зависимости именно для $l=1$. Однако, системе свойственны режимы колебаний с дробной кратностью, при которых соударения среды с платформой и преградой происходят 2, 3 и более раз за один период колебаний. Временные диаграммы таких режимов с $l=1/2$ приведены на рис.57. При таких режимах в течение периода одно соударение происходит с большей скоростью, второе со значительно меньшей, что соответствует различным фазам встречи индентора с виброплитой. С точки зрения технологии упрочнения ПД такие режимы следует считать нежелательными, т.к. они будут приводить к покрытию поверхности неравномерными по площади и глубине пластическими отпечатками.

Изменение контактных свойств поверхности виброплиты и препятствия не приводит к качественному изменению рассмотренных явлений. Однако следует отметить, что при конструктивных ограничениях на величину зазора в камере покрытие отражающей поверхности более мягким материалом (резина, полиуретан) позволяет вывести ВУС из нежелательного режима дробной кратности за счет увеличения времени соударения.

Схемы обработки (рис.50.в,г), отличающиеся конструктивным исполнением, одинаковы при их анализе как виброударных систем. Поэтому в качестве модельной использовалась ВУС, представленная на рис.58.

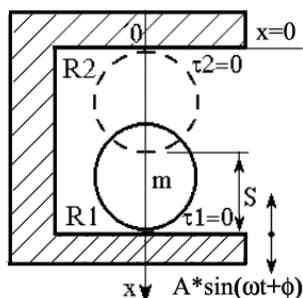


Рис.58. Схема виброударной системы, моделирующей схемы упрочнения (рис.50.в,г)



Технология машиностроения

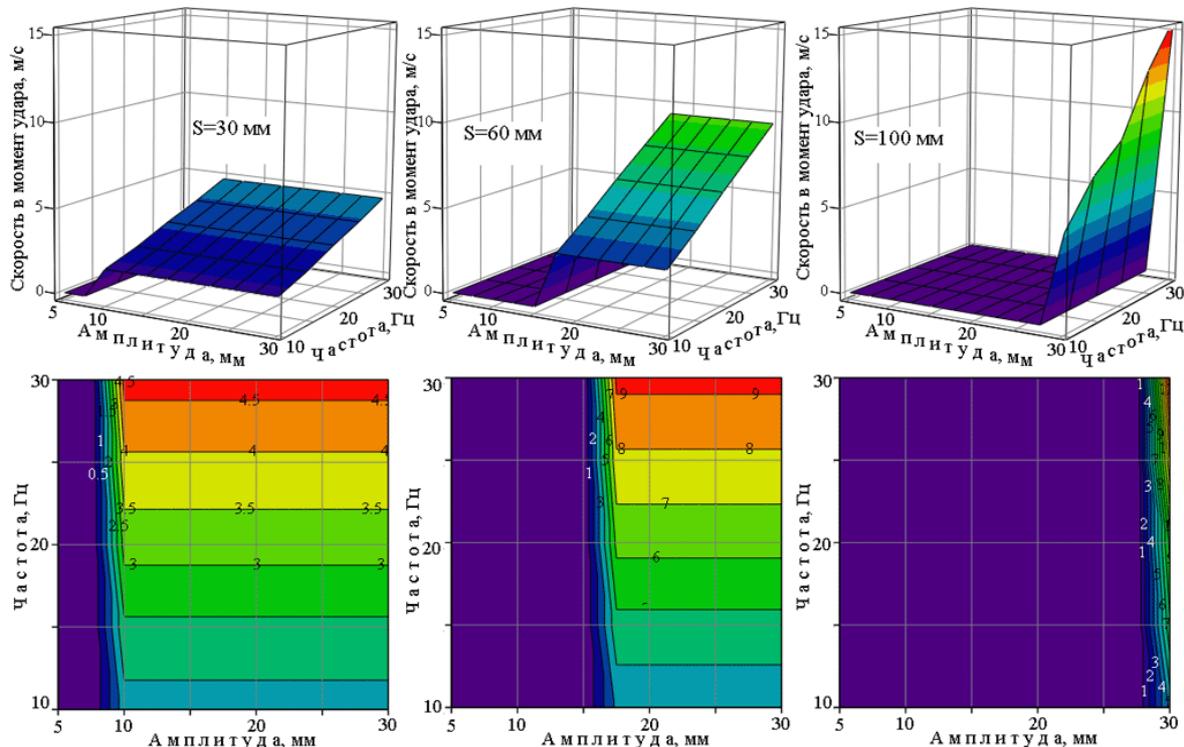


Рис.56. Зависимость скорости соударения инденторов обрабатываемой среды с виброплитой от частоты и амплитуды вибрации в режиме стационарных виброударных колебаний (зазор S в камере 30, 60, 100 мм; виброплита и преграда – сталь)

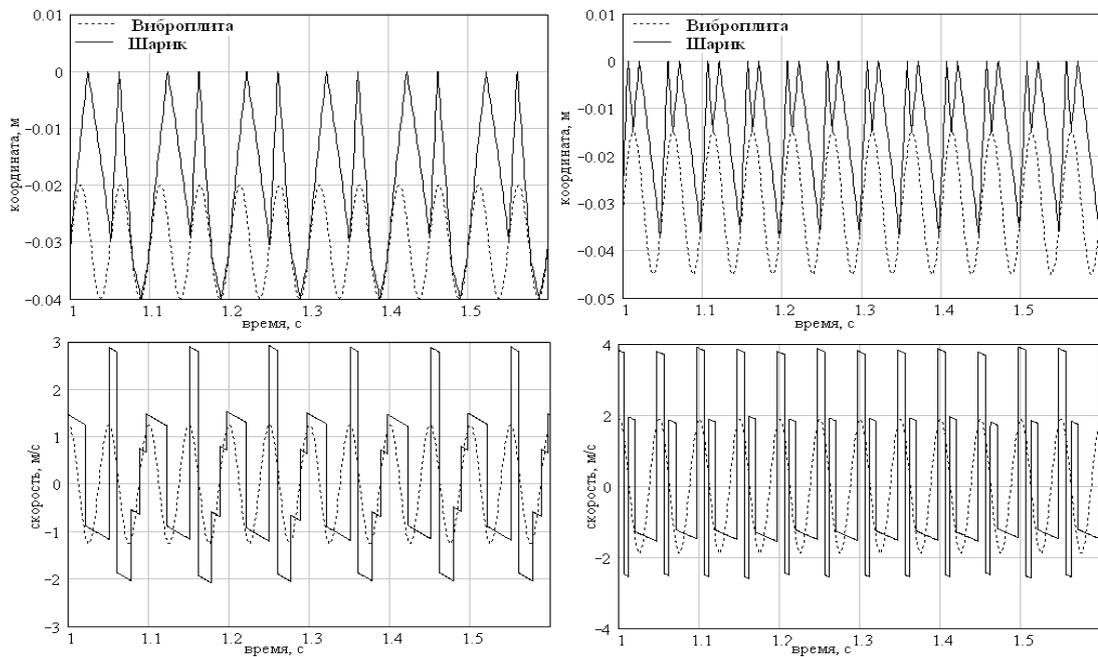


Рис.57. Временные диаграммы виброударных колебаний в системе (рис.51) в режимах дробной кратности
(Амплитуда 1 см, частота 20Гц; зазор 30 мм; виброплита и преграда – сталь)



Технология машиностроения

В результате ее анализа, проведенного по изложенной методике, установлены следующие закономерности, присущие системе. По сравнению с рассмотренной схемой, содержащей виброплиту и неподвижную преграду, в данной системе режим стационарных колебаний устанавливается практически мгновенно – через 5-7 периодов колебаний (рис.59). Однако эти стационарные режимы коренным образом отличаются от традиционных. В частности, представленные на рис.59 временные диаграммы иллюстрируют быстрое установление стационарного режима, при котором в течение одного периода происходит вначале два удара о верхнюю плиту и ни одного удара о нижнюю, затем наоборот – два удара о нижнюю и ни одного о верхнюю. Такие режимы следует назвать стационарными «в среднем», т.е. процесс стационарен в течение нескольких периодов, но в течение одного периода он не может быть назван таковым. Попытки численного решения системы фазовых уравнений для определения областей существования стационарных режимов показали, что эти области реализуются в очень узких диапазонах частот и амплитуд возбуждения.

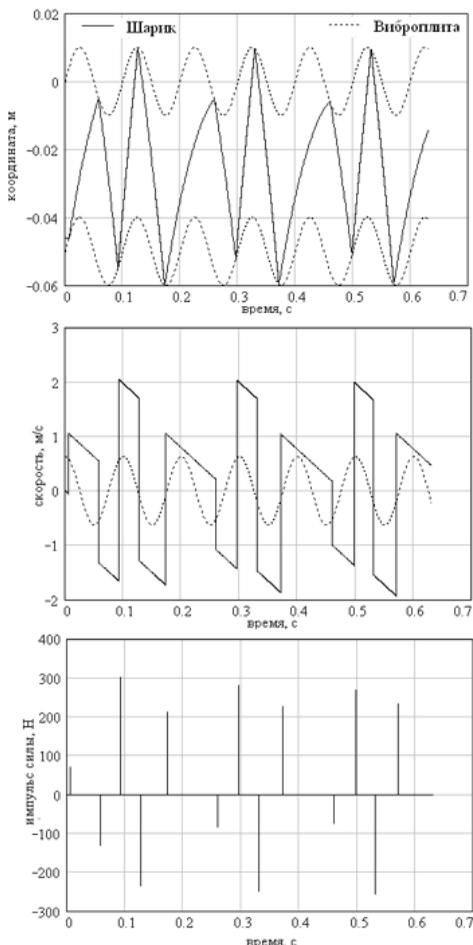


Рис.59. Временные диаграммы установления стационарных виброударных колебаний в системе (рис.58)

Стальной сферический индентор диаметром 5 мм, отпущенный из начального положения $x_0=0,05$ м падает на стальную виброплиту, колеблющуюся с амплитудой 10 мм и частотой 10 Гц, от которой отскакивает вверх к синхронно вибрирующей верхней стальной плите.

Следовательно, достичь полноценного стационарного режима в производственных условиях без специальных средств регулирования частоты и амплитуды, по-видимому, невозможно. Вместе с тем, диаграммы рис.59 убедительно доказывают, что такой процесс, как представлен на графиках, должен быть эффективен: и верхняя и нижняя вибрирующие поверхности получают в среднем один удар за период; сила этих ударов варьирует в пределах 20%, что вполне допустимо.



Технология машиностроения

С целью установления адекватности приближенного модельного описания процесса виброударного упрочнения технологические схемы ППД, приведенные на рис.50 были подвергнуты экспериментальной проверке, в ходе которой исследовалось влияния режимов работы вибростанка и размерных характеристик на стационарность и кратность виброударных колебаний, на развиваемые при этих режимах скорости частиц, равномерность покрытия поверхности пластическими отпечатками и величину создаваемых вибронаклепом остаточных напряжений.

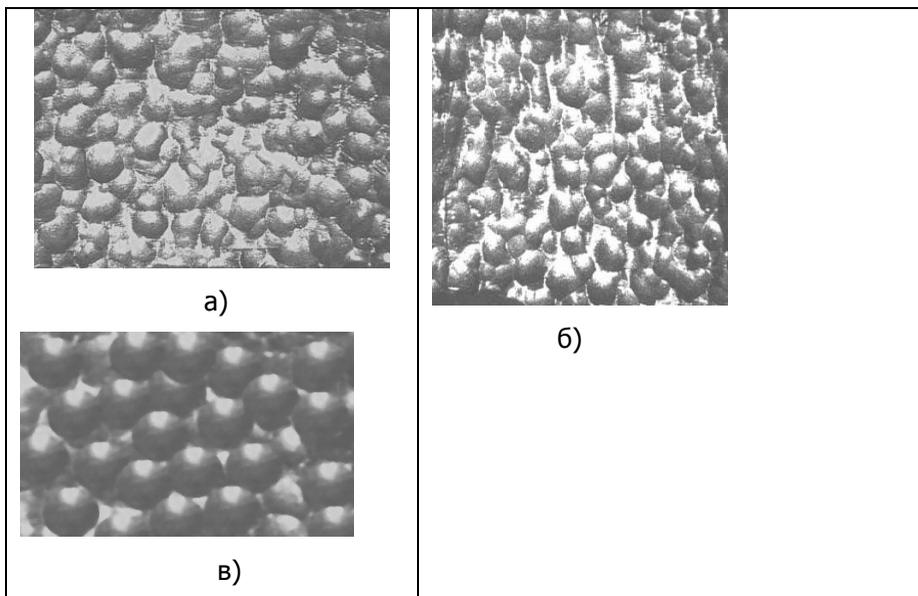


Рис.60. Вид на поверхность образцов после виброударной обработки в инденторах $d=6\text{мм}$ по схеме рис.52.г на частоте 16 Гц а),в) материал АВТ, амплитуда 10 мм; б) материал 40ХН2МА, амплитуда 20 мм а), б) – время 10 мин, в) – время 1 мин (Снимки четко выявляют неравномерность диаметров отпечатков и расстояний между ними)

Для проверки влияния кратности виброударного режима на рассеяние диаметров отпечатков и расстояния между ними группа образцов была обработана на эксцентриковом вибростанке при амплитуде 15 мм и частотах 10, 30 Гц по схеме рис.50.б. Подбрасывание массы инденторов $d=6\text{ мм}$ осуществлялось поверхностью образцов, прикрепленных к дну камеры с открытым



верхом. На рис.61 приведены эмпирические частоты распределения измеренных величин.

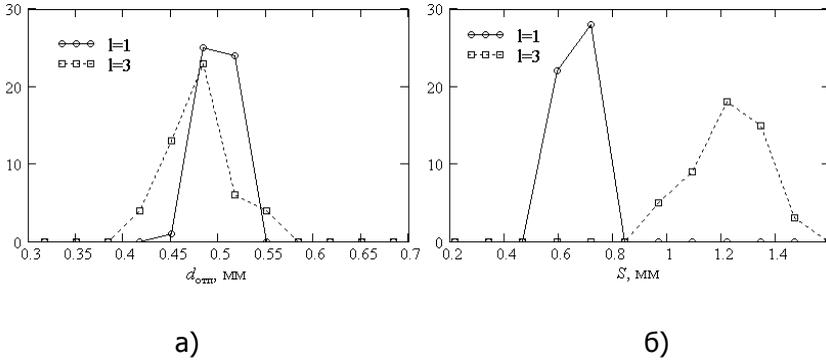


Рис.61. Эмпирические частоты распределения диаметров пластических отпечатков и расстояний между ними. Время обработки на эксцентриковом вибростанке 2 мин.

Данные приведены для двух кратностей режима $l=1$ и $l=3$

Влияние стационарности процесса виброударных колебаний исследовалось на схеме рис.50 с использованием эксцентрикового вибростанка ВУЭ-10. Неподвижную преграду, ограничивающую движение шариков среды вверх можно было перемещать, регулируя зазор; частоту и амплитуду колебаний камеры также можно было изменять путем перестановки клиновых ремней на шкивах и регулировкой эксцентриситета. Амплитудно-частотные характеристики режима выбирались такими, чтобы амплитуда виброскорости камеры была неизменной. На рис.62 приведены результаты измерения рассеяния диаметров отпечатков после 2 мин обработки на двух режимах: I – ($A=8$ мм, $f=20$ Гц, $S=50$ мм – стационарный с кратностью $l=1$); II – ($A=10$ мм, $f=16,6$ Гц, $S=50$ мм - нестационарный). Факт стационарности легко устанавливался визуально, т.к. камера имела стеклянную боковую крышку, а также на слух: при стационарных колебаниях шум от ударов был ритмичным в такт с движением камеры, при нестационарных – в значительной степени белым шумом. Для большей наглядности приведен результат образца из более мягкого сплава АВТ.

Рисунок иллюстрирует результат одного из экспериментов с вариацией характера движения среды. Количественный анализ микрофотографий, типа приведенных на рис.60, подтвердил вывод теоретического исследования о необходимости



Технология машиностроения

обеспечения стационарного режима к камере высокоамплитудного вибростанка. Действительно, из рис.62 следует, что при хаотичном движении диаметры отпечатков варьируют от 0,3 до 1 мм, что нежелательно. С одной стороны, такое рассеяние приводит к покрытию поверхности отпечатками, не создающими упрочнения на требуемую глубину, и, следовательно, требует увеличения времени обработки, а с другой – может приводить к образованию глубоких вмятин – потенциальных концентраторов микронапряжений.

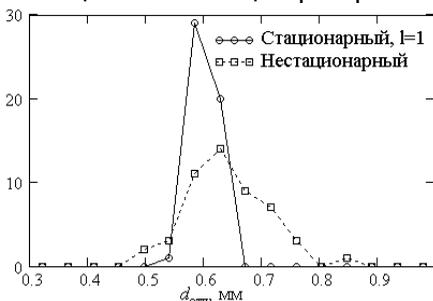


Рис.62. Эмпирические частоты распределения диаметров пластических отпечатков при стационарном и нестационарном режиме виброударных колебаний. Время обработки на эксцентриковом вибростанке 2 мин

Следующая группа экспериментов имела целью подтверждение выводов о влиянии частоты и амплитуды возбуждающей вибрации на динамические характеристики и результаты процесса упрочнения. В связи с тем, что измерение ударных скоростей частиц могло дать представление о динамике процесса, но давало мало информации об его интенсивности и производительности, измеряемым выходным фактором были остаточные напряжения, создаваемые на том или ином режиме обработки. Эта характеристика давала интегрированное представление о результативности процесса. Равномерность обработки оценивалась по рассеянию диаметра отпечатков с помощью системы СИАМС-6000 по описанной выше методике.

На рис.63 даны графики распределения остаточных напряжений по глубине в образцах, обработанных при тех же условиях, что и на рис.62 за исключением того, что время обработки составляло 10 мин. Экспериментальные точки, полученные после измерения трех одинаковых образцов, сглажены сплайнами третьего порядка.



Технология машиностроения

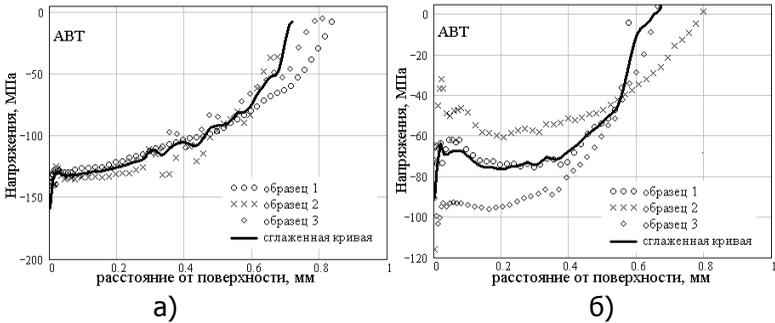


Рис.63. Примеры распределения поверхностных остаточных напряжений после упрочняющей обработки

- а) обработка на режимах, соответствующих сплошной линии на рис.62;
- б) – пунктирной линии на рис.62

Несмотря на существенный разброс экспериментальных точек, вызванный погрешностью определения толщины стравливаемого слоя материала, видна общая тенденция в поведении поверхностных остаточных напряжений после вибронаклепа. По мере удаления от поверхности напряжения от сжимающих переходят через ноль и становятся растягивающими на глубинах, более 0,7 мм. Согласно технологической инструкции НИАТ (НИИ авиационной технологии) при измерении распределения остаточных напряжений нормируются две величины:

- $\sigma_{0,35}$ – величина напряжений на глубине 0,35 мм и
- h_0 – глубина, на которой напряжения переходят через ноль.

Эти два параметра позволяют ввести с помощью всего двух чисел обобщенную характеристику снятых кривых. Беря эти параметры за основу, можно сказать, что обработка на описанном выше

стационарном режиме (рис.62) создала напряжения $\sigma_{0,35} = 120$ МПа и полную глубину наклепа 0,7 мм; обработка на нестационарном

режиме создала напряжения $\sigma_{0,35} = 70$ МПа и полную глубину наклепа 0,65 мм. Результаты эксперимента по определению

влияния частоты вибрации на величины $\sigma_{0,35}$ и h_0 для про-



Технология машиностроения

стейшей схемы (рис.50.б), дающие косвенное подтверждение выводу теоретического исследования, приведены на рис.64. Обработка производилась на частотах 10, 13, 16, 20 Гц. Амплитуду колебаний регулировали так, чтобы создать режим однократных виброударных колебаний. Время обработки составило 20 минут. Это время было назначено после установления того факта, что его достаточно для прекращения роста напряжений.

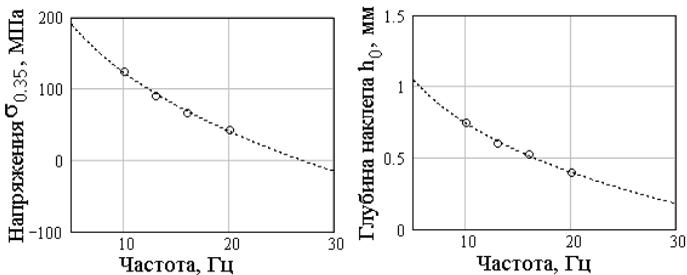


Рис.64. Влияние частоты вибрации на достигаемые остаточные напряжения и глубину упрочнения при обработке на стационарном однократном режиме по схеме рис.50.б

(Точками обозначены экспериментальные точки, полученные путем усреднения по трем замерам)

Как видно из графиков, эффективность обработки падает с ростом частоты. Это объясняется тем, что для сохранения режима однократных виброударных колебаний необходимо было снижать амплитуду. При неизменной амплитуде быстро возрастала кратность режима, что, естественно, должно было приводить к уменьшению коэффициента использования машинного времени вибростанка. Скорость спадания остаточных напряжений с ростом частоты уменьшается. Это можно объяснить тем, что диаметры отпечатков и создаваемые напряжения сжатия зависят от скорости соударения шариков с поверхностью образца нелинейно – упрочняемый материал ведет себя как упруго-пластичная упрочняющаяся среда. Тем не менее, полученный экспериментальный результат дает убедительное подтверждение теоретически установленному факту, касающемуся влияния частоты вибрации на скорости соударении при стационарном виброударном подбрасывании среды.

Аналогичный эксперимент был проведен для схемы (рис.50.а) с фиксированной верхней преградой и образцом, укрепленным на виброплите. Зазор в системе составлял 30 мм,



Технология машиностроения

амплитуда была неизменной – 12 мм. Частоту меняли ступенчато: 10, 16, 20, 24, 30 Гц, при этом кратность режима устанавливалась на слух. Время обработки составляло 5 мин. Как видно из приводимых на рис.65 графиков с ростом частоты наблюдается предсказанный теоретически рост динамического воздействия на поверхность детали: величина и глубина залегания остаточных напряжений растут с ростом скоростей соударения, в свою очередь увеличивающихся с ростом частоты. Эта закономерность была подтверждена также на стальных образцах. Что касается влияния амплитуды колебаний на динамические характеристики процесса, то такого влияния установить не удалось за исключением выявленного при теоретическом исследовании наличия пороговой амплитуды, ниже которой исследуемая виброударная система переходит в изображенную на рис.50.б.

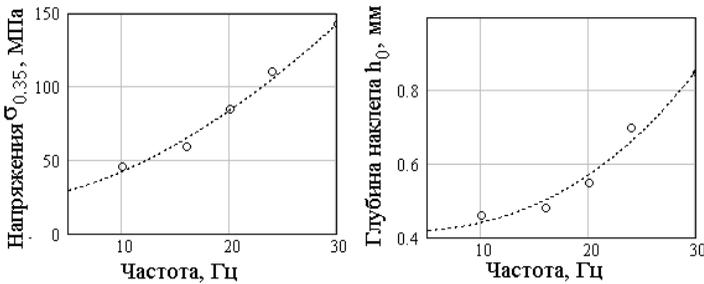


Рис.65. Влияние частоты вибрации на достигаемые остаточные напряжения и глубину упрочнения при обработке на стационарных режимах с дробной кратностью по схеме рис.50.а (Точками обозначены экспериментальные точки, полученные усреднением по трем замерам)

Результаты экспериментальных исследований по влиянию режимов работы вибростанков на их производительность и эффективность при абразивной отделочной и виброударной упрочняющей обработки, свидетельствуют, что основные закономерности, установленные на разработанных теоретических моделях получили убедительное подтверждение опытом. Эти модели продемонстрировали адекватность и хорошие предсказательные свойства для количественного определения динамических характеристик процессов, а также их интенсивности и производительности.

Использование разработанного алгоритма и программного средства моделирования, которое позволяет инженеру, задав амплитуду, частоту и размер зазора в вибрирующей камере, вы-



Технология машиностроения

явить характер возникающего виброударного процесса. В условиях современного высокотехнологичного производства, где и применяются процессы упрочнения ответственных деталей, такой подход является более естественным, чем использование таблиц и номограмм, объем которых должен измеряться десятками страниц, а наглядность остается весьма низкой. Вычислительный процесс, необходимый для получения полной картины процесса, занимает при использовании среднего персонального компьютера 2-3 минуты. Запуск процесса моделирования, заключающийся во вводе 3-5 чисел, занимает менее одной минуты. Остальное время занимают необходимые во всяком технологическом исследовании инженерный анализ и осмысление полученных результатов.



4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ППД НА ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ

Для оценки характеристик сопротивления усталости материала, в частности предела выносливости, проводят усталостные испытания гладких (без концентраторов напряжений) полированных лабораторных образцов диаметром $d_0 = 7.5 \div 10$ мм. При испытании натуральных деталей значения предела выносливости обычно в 2–6 раз меньше. Снижение долговечности натуральных деталей оценивается коэффициентом снижения предела выносливости K , характеризующим разницу пределов выносливости натуральных деталей на множестве всех плавок по сравнению с гладкими полированными образцами. При эксплуатации деталей подвергнутых формообразующей обработке в условиях растяжения–сжатия или изгибе при отсутствии коррозии для расчета коэффициента K предложена зависимость [4]

$$K = \frac{\bar{\bar{\sigma}}_{-1}}{\bar{\bar{\sigma}}_{-1d}} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{K_A} \quad (78)$$

при эксплуатации в условиях кручения

$$K = \frac{\bar{\bar{\tau}}_{-1}}{\bar{\bar{\tau}}_{-1d}} = \left(\frac{K_{\tau}}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \quad (79)$$

где, $\bar{\bar{\sigma}}_{-1}, \bar{\bar{\tau}}_{-1}$ – медианные значения пределов выносливости гладких лабораторных образцов при изгибе и кручении соответственно;

$\bar{\bar{\sigma}}_{-1d}, \bar{\bar{\tau}}_{-1d}$ – медианные значения пределов выносливости натуральных деталей при изгибе и кручении соответственно;

Из выражений 78 и 79 следует, что основными факторами, влияющими на усталостную прочность детали являются концентрация напряжений на детали (как конструктивных, так и технологических), абсолютные размеры детали, неравномерность распределения механических свойств по сечению детали, качество обработки поверхности. Концентрацией напряжения принято считать увеличение напряжения по сравнению с номинальным в местах резкого изменения очертания или размеров детали. Фактическое снижение предела выносливости вследствие концентрации напряжений оценивают с помощью эффективных коэффициентов



Технология машиностроения

концентрации напряжений K_σ и K_τ , величины которых определяются отношением предела усталости гладкого полированного образца (при растяжении–сжатии или изгибе– σ_{-1} , при кручении– τ_{-1}) к пределу усталости образца с надрезом $\sigma_{-1\delta}$, $\tau_{-1\delta}$:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1\delta}}, \quad K_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1\delta}} \quad (80)$$

Как показывают многочисленные исследования, наиболее чувствительными к концентрации напряжений являются высокопрочные материалы, что связано с низкой способностью релаксировать локальные напряжения и сопротивлением хрупкому разрушению.

Влияние масштабного фактора проявляется в снижении механических свойств металла с ростом размеров детали и оценивается коэффициентами $K_{d\sigma}$, $K_{d\tau}$, представляющие собой отношение предела выносливости образца или детали диаметром d к пределу выносливости гладких лабораторных образцов диаметром d_0 :

$$k_{d\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}}, \quad k_{d\tau} = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}} \quad (81)$$

Влияние масштабного фактора на снижение предела выносливости обусловлено:

1. усилением неоднородности свойств по сечению детали в связи с ограниченной прокаливаемостью; влиянием механической обработки; ухудшением качества отливки или поковки металла с увеличением абсолютных размеров детали;
2. увеличением вероятности появления дефектов в связи со статической природой усталостных явлений;
3. увеличением зоны объёма металла, охватываемого повышенными напряжениями;
4. наличием геометрических концентраторов напряжений; чем выше эффективный коэффициент концентрации напряжений, тем сильнее проявляется масштабный фактор и, наоборот, с увеличением абсолютных размеров, эффективный коэффициент концентрации напряжений растёт.

Известно, что реальный металл состоит из отдельных зёрен, а зерно состоит из малых объёмов с неправильной кристаллической решёткой, называемых блоками мозаичной структуры или субзёрнами. Субзёрна имеют различные направления механических свойств, следовательно, зерно будет иметь усреднённое



Технология машиностроения

направление механических свойств. А так как, зерно является малой величиной по сравнению с объёмом всего металла, то механические характеристики всего металла тоже усредняются и можно сказать, что реальные тела анизотропные. И чем больше размеры детали, тем больше неравномерность распределения механических свойств. Влияние анизотропии на сопротивление усталости оценивается коэффициентом анизотропии:

$$k_A = \frac{\sigma_{-1non}}{\sigma_{-1prod}}, \quad (82)$$

где σ_{-1non} –предел выносливости образцов, вырезанных из заготовок в направлении, перпендикулярном направлению волокон металла, образующихся при прокатке, ковке, штамповке;

σ_{-1prod} –то же, в направлении, совпадающем с направлением волокон.

Влияние анизотропии при растяжении–сжатии или изгибе необходимо учитывать ещё и в тех случаях, когда в зонах максимальной напряжённости первое главное напряжение направлено перпендикулярно волокнам (направлению прокатки). При кручении влияние анизотропии не учитывается, т.е. $k_A = 1$.

В результате поверхностного пластического деформирования происходит измельчение зёрен и образование упорядоченной структуры при невысоких интенсивностях деформации. По мере нарастания нагружения, дробление зёрен достигает высокой интенсивности, направление которых ориентировано в сторону пластической деформации. Учитывая это обстоятельство, можно утверждать, что в тонком поверхностном слое распределение механических свойств будет постоянным и равнонаправленным, поэтому можно принять коэффициент анизотропии k_A равным 1.

Помимо более равномерного распределения механических свойств, в частности предела текучести, твёрдости и предела прочности материала. Это приводит к повышению сопротивления пластической деформации и сопротивлению развития трещин усталости, тем самым, снижая пики максимальных напряжений в местах концентрации напряжений.

В процессе обработки деталей методами ППД в зависимости от характера силового воздействия инструмента на поверхностный слой может осуществляться либо отделочная упрочняющая обработка, позволяющая улучшить несущую способность исходной шероховатости поверхности в результате деформирования, либо упрочняющая, приводящая к формированию нового микро-



Технология машиностроения

рельефа и физико–механических характеристик поверхностного слоя.

Учитывая это обстоятельство, формулы (78, 79) расчета коэффициента снижения предела выносливости оценивающий снижение долговечности натуральных деталей упрочненных методами ППД могут быть преобразованы к виду:

Для деталей подвергнутых отделочно – упрочняющей обработке (с рабочими давлениями $P \leq 1.5\sigma_T$):

- при растяжении–сжатии:

$$K = k_{\sigma} + \frac{1}{k'_{F\sigma}} - 1 \quad (83)$$

- при изгибе:

$$K = \frac{k_{\sigma}}{k_{d\sigma}} + \frac{1}{k'_{F\sigma}} - 1 \quad (84)$$

- при кручении:

$$K = \frac{k_{\tau}}{k_{d\tau}} + \frac{1}{k'_{F\tau}} - 1 \quad (85)$$

где, $k'_{F\tau}$, $k'_{F\sigma}$ –коэффициенты, учитывающие изменение физико–механических характеристик микропрофиля в процессе ППД.

Так как при отделочно – упрочняющей обработке происходит пластическая деформация микрогребешков приводящая к снижению их высоты и повышению их твёрдости, представим $K'_{F\sigma}$ как функцию:

$$K'_{F\sigma} = f(R_{\mu i}, \Delta H_{\mu i}), \quad (86)$$

где $R_{\mu i}$ –высота микропрофиля, сформированного в процессе ППД, мкм;

$H_{\mu i}$ –микротвёрдость гребешков, МПа.

Оценив влияние высоты микропрофиля сформированного в процессе ППД на усталостную прочность, по зависимости предложенной в работе [4] для расчета коэффициента K учитывающего влияние шероховатости поверхности на усталостную прочность в формуле 78, 79, а влияние микротвёрдости микрогребешков через величину изменения (прироста) микротвердости после их ППД ΔH получим формулы для расчета коэффициентов $K'_{F\sigma}$,

$K'_{F\tau}$



Технология машиностроения

$$K'_{F\sigma} = 1 - 0.22 \lg R_{\mu} \left(\frac{\sigma_T}{20} - 1 \right) \Delta H \quad (87)$$

$$K'_{F\tau} = 0.575 k_{F\sigma} + 0.425 \Delta H \quad (88)$$

Для деталей подвергаемых упрочняющей обработке (при рабочих давлениях $P \geq 3\sigma_T$), когда в процессе ППД формируется практически новый сглаженный микрорельеф (т.е. $k_{F\sigma} = 1, k_{F\tau} = 1$) и преобладающее значение на изменение усталостной прочности детали оказывают качественно новые физико-механические характеристики поверхностного слоя, такие как остаточные напряжения сжатия, степень и глубина наклёпа, зависимости (78, 79) преобразуются к виду:

- при растяжении-сжатии:

$$K = \left(\frac{\sigma}{\sigma_v} - 1 \right) \frac{1}{K_v} \quad (89)$$

- при изгибе:

$$K = \left(\frac{k_{\sigma}}{k_{d\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{K_v} \quad (90)$$

- при кручении:

$$K = \left(\frac{k_{\tau}}{k_{d\tau}} - 1 \right) \frac{1}{K_v}, \quad (91)$$

где K_v – коэффициент, учитывающий влияние ППД на усталостную прочность деталей.

В связи с тем, что в процессе упрочнения основные физико-механические характеристики качества ПС (остаточные напряжения сжатия, степень и глубина наклёпа) формируются одновременно, то практически трудно выделить влияние каждого из них на увеличение усталостной прочности. Поэтому, в большинстве теоретических и экспериментальных работ устанавливается только качественный характер зависимости усталостной прочности от отдельных характеристик качества, при этом исключается влияние остальных. Для практики машиностроения важное значение имеет установление закономерности комплексного влияния характеристик качества ПС на усталостную прочность деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения. Это позволит правильно осуществить оптимизацию технологических процессов упрочнения и прогнозировать возможности получения поверхности деталей с заранее заданным качеством и эксплуатационными свойствами.

С целью количественной оценки влияния методов



Технология машиностроения

ППД на усталостную прочность деталей, определяемой коэффициентом K_f , представляющего собой отношение пределов выносливости упрочнённых ППД σ_{-1}^{ynp} и исходных деталей $\sigma_{-1}^{исх}$, проведем качественный анализ расположения по сечению сформированного ППД поверхностного слоя эпюр физико-механических характеристик и представленный на рис.66.

На этом рисунке, эпюра 1 характеризует распределение пределов выносливости по поперечному сечению, построенная по кривым распределения микротвёрдости в предположении, что

$$\frac{\sigma_{-1}^{ynp}}{\sigma_{-1}^{исх}} = \frac{H_{\mu}^{ynp}}{H_{\mu}^{исх}}, \text{ т.е. предел выносливости повышается пропорционально приросту микротвёрдости } \Delta H = \frac{H_{\mu}^{ynp}}{H_{\mu}^{исх}}.$$

Эпюра 2 показывает распределение остаточных напряжений в поверхностном слое, установленных экспериментально.

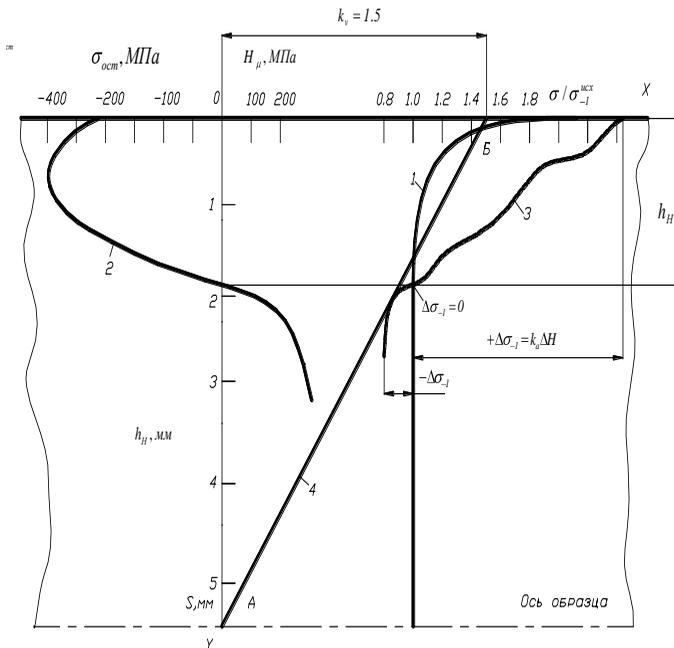


Рис.66. Графо-расчётная схема, раскрывающая эффект упрочнения гладких образцов методами ППД

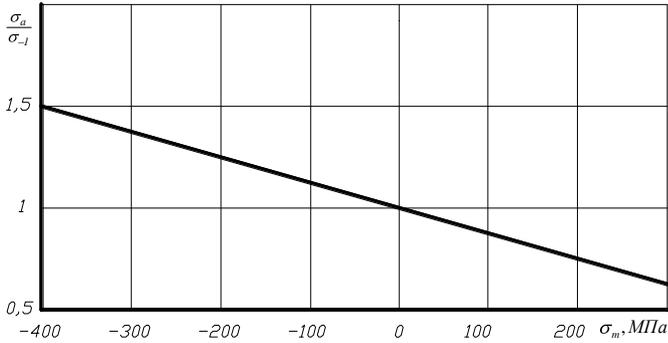


Рис.67. Диаграмма предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах для улучшенных среднеуглеродистых сталей

Эпюра 3, характеризует распределение пределов выносливости микрообразцов, вырезанных из разных зон по сечению детали, с учётом влияния остаточных напряжений и упрочнения от наклёпа и представляет собой произведение абсциссы значений прироста микротвёрдости ΔH по эпюре 1 на отношение $\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = k_a$, определяемое по диаграммам предельных амплитуд

(рис.67) или по формулам:

- для хрупких материалов:

$$K_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = 1 - \frac{\sigma_{ocm}}{\sigma_B} \quad (92)$$

- для пластичных материалов:

$$K_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{ocm}}{\sigma_B}}, \quad (93)$$

где σ_B — предел прочности.

В поверхностном слое, в котором наведены остаточные напряжения и наклёп, эпюра 3 находится правее эпюры 1, при этом происходит прирост предела выносливости $+\Delta\sigma_{-1}$ на



величину $k_a \Delta H$, там, где действуют растягивающие напряжения, и отсутствует наклёп предел выносливости снижается до исходного (неупрочнённого) значения. Предельная эпюра распределения рабочих напряжений представлена эпюрой 4, которая является касательной к эпюре 3, и построена на основе экспериментально установленного факта, что разрушение от усталости начинается тогда, когда рабочие напряжения достигнут предела выносливости в какой-либо точке поперечного сечения.

Рабочее напряжение на поверхности по эпюре 4, отнесённое к пределу выносливости неупрочнённого образца (шкала $\sigma / \sigma_{-1}^{ucx}$), определяет эффект упрочнения, характеризуемое расчётным коэффициентом k_v^p .

На основе проведенного анализа запишем уравнение эпюры предельных рабочих напряжений

$$y = \frac{S}{2} \left(1 - x k_v \right) \quad (94)$$

где S – расстояние (диаметр, толщина) между точками поперечного сечения, в которых действует максимальный градиент напряжений, мм (рис.68).

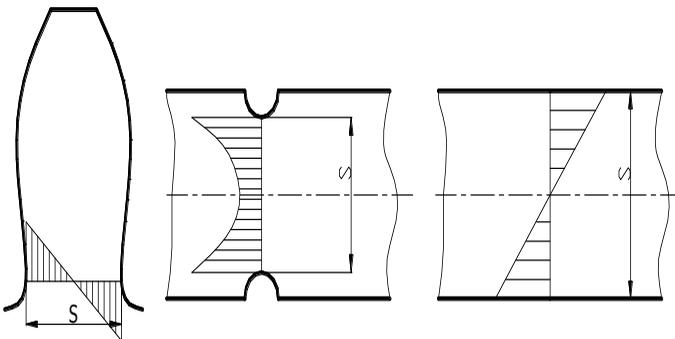


Рис.68. Наиболее опасные точки поперечного сечения:
 а) ножка зуба шестерни или колеса; б) пластины с боковым надрезом;
 в) гладкие цилиндрические поверхности

При глубине упрочнённого слоя

$$y = h_H, \quad x = k_a \Delta H, \quad (95)$$

Подставим условие (95) в уравнение (94) и разрешив относительно k_v получим зависимость для определения коэф-



коэффициента упрочнения:

$$k_v = \frac{k_a \Delta H}{1 - \frac{2h_H}{S}} \quad (96)$$

Из формулы (96) следует, что для определения коэффициента k_v необходимо задать требуемые величину остаточных напряжений, прирост микротвёрдости и глубину наклёпа, которые могут быть заданы на этапе проектирования для оценки прогнозирования повышения усталостной прочности деталей, упрочнённых ППД. Следует отметить, что при определении коэффициента k_a необходимо принимать значения остаточных напряжений у поверхности, т.к. здесь действуют максимальные рабочие напряжения, в противном случае значения k_v окажутся завышенными, что в свою очередь приведёт к завышению технологических режимов упрочнения.

Следует отметить, еще один установленный в ряде работ и экспериментально подтвержденный факт, свидетельствующий о том, что глубина залегания в поверхностном слое остаточных напряжений h_σ влияет на смещение места зарождения усталостной трещины вглубь поверхностного слоя.

Предположим, что глубина наклёпа и глубина залегания остаточных напряжений связаны между собой соотношением

$$h_\sigma = \gamma h_n, \quad (97)$$

где γ – коэффициент, учитывающий несовпадение глубины наклёпа с глубиной залегания остаточных напряжений.

Тогда с учетом этого соотношения расчетно-аналитическая зависимость для оценки влияния методов ППД на повышение усталостной прочности примет вид

$$k_v = \frac{k_a \Delta H}{1 - \frac{2h_n \gamma}{S}}, \quad (98)$$

где

$$\chi = (\gamma - h_n (\gamma - 1)^2) \quad (99)$$

На основе результатов экспериментальных исследований физико-механических характеристик ПС формируемых при упроч-



Технология машиностроения

нении различными методами ППД для проектирования операций рекомендованы следующие усредненные значения коэффициентов γ :

- при обработке со скоростями инденторов V до 2 м/с и усилием деформирования P_v до 6000Н равным $\gamma = 2,23$; при усилиях свыше 6000Н $\gamma = 2,8$;
- при скоростях от 2 до 5 м/с $\gamma = 1,82$;
- при скоростях от 5 до 50 м/с $\gamma = 2,12$;
- при скоростях более 50 м/с: $\gamma = 2,64$;

Таким образом, полученная расчётно–аналитическая модель (98) позволяет комплексно оценить влияние характеристик качества поверхностного слоя, формируемых в процессе упрочнения ППД на повышение усталостной прочности деталей без проведения специальных экспериментальных и натурных испытаний.

С целью проверки применимости предложенной модели для оценки влияния методов ППД на повышение усталостной прочности деталей были проведены экспериментальные исследования результаты, которых представлены в табл.7.

Т а б л и ц а 7

Образец	Материал	Прирост микро-твёрдости, ΔH	Глубина наклёпа h_n , мм	k_v^p	$k_v^{\mathcal{E}}$	Погреш. расчёта δ , %
ЦОС–I	Сталь20	1,09	0,15	1,126	1,27	11,34
ЦОА–II	АК6Т–1	1,15	0,15	1,134	1,25	9,28
ПО–III	Д16Т	1,19	0,35	1,212	1,32	8.18

Из результатов представленных в таблице 7 следует, что экспериментальные значения коэффициента упрочнения $k_v^{\mathcal{E}}$ превышают расчётные $k_v^{p.a.}$. Это свидетельствует о том, что используемая для оценки эффекта упрочнения расчётная модель, не учитывает дополнительные факторы, оказывающие влияние на эффективность ППД в повышении усталостной прочности и в первую очередь, сопротивление хрупкому разрушению. Вместе с тем, близость величин в пределах 8–12% подтверждает целесообразность ее использования для оценки влияния методов ППД на усталостную прочность деталей. Рассматривая влияние отдельных



Технология машиностроения

факторов на повышение усталостной прочности можно отметить что, повышение микротвёрдости упрочнённых образцов непропорционально повышению предела усталости, как на это указывалось в ряде работ. Вместе с этим, также не наблюдается закономерности повышения усталостной прочности, оцениваемое коэффициентом упрочнения k_v^{ϑ} от прироста микротвёрдости и глубины наклёпа, что указывает на отсутствие чёткой зависимости влияния отдельных факторов на повышение усталостной прочности.

В таблице 8 представлены значения коэффициентов K_v установленные расчетно-аналитическим методом, K_p^a графо-расчетным методом и усталостным испытанием на основе данных о физико-механических характеристиках поверхностного слоя и повышении усталостной прочности приведенных в работах посвященных исследованиям методов ППД, таких как виброударная обработка ВиУО (рис.71), гидродробеструйная ГДО (рис.69), вибрационная ударно-импульсная обработка ВиУИО (рис.70).

Сравнительный анализ значений коэффициентов K_v полученных разными методами показал, что предложенная расчётно-аналитическая модель позволяет с достаточной для практики точностью (в пределах 3 – 16%) оценить эффективность влияния методов ППД на повышение усталостной прочности. Расхождение расчётных и экспериментальных значений по-видимому связано с действием других факторов, влияющих на усталостную прочность: сопротивление пластической деформации и хрупкому разрушению, работы развития трещины усталости. Эти выводы подтверждаются тем, что, несмотря на достаточно высокие значения отдельных характеристик качества ПС у некоторых материалов не наблюдается заметного повышения усталостной прочности, в то время как при относительно невысоких значениях наблюдается заметный прирост.

В связи с этим практически невозможно проследить чёткую закономерность влияния отдельных факторов на повышение усталостной прочности. Так, например, при достаточно высоком значении остаточных напряжений у стали 45ХН2МФА со структурой троостит, не наблюдается заметное повышение усталостной прочности, более того предел выносливости этой стали в 1,02 раза меньше стали со структурой сорбит, причём величина остаточных напряжений у последней в 1.5 раза меньше. Подобные «противоречия» можно проследить и при исследовании влияния



Технология машиностроения

других параметров качества на повышение усталостной прочности (табл.8). Эти обстоятельства указывают на необходимость комплексной оценки влияния методов ППД на усталостную прочность деталей.

Применение предложенной расчётно – аналитической модели позволяет прогнозировать эффект упрочнения достигаемый методами ППД без проведения дополнительных экспериментальных исследований, что существенно ускоряет сроки конструкторской и технологической подготовки производства с наименьшими затратами.

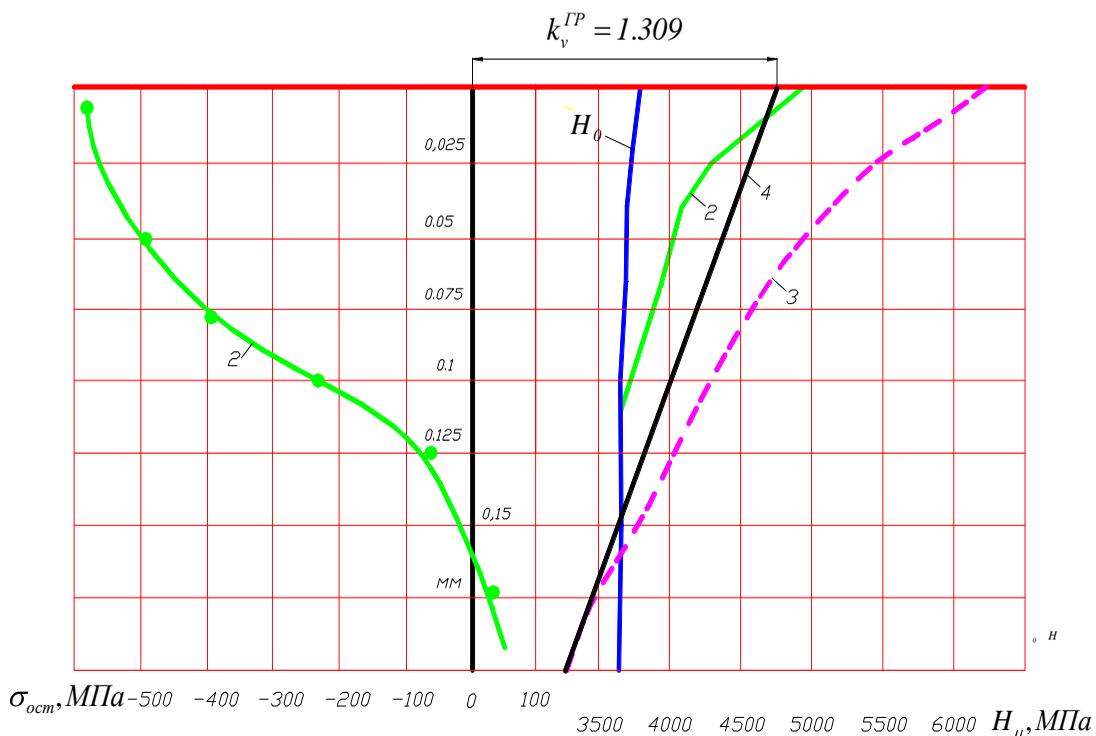


Рис.69. Графо–расчётное определение коэффициента упрочнения образцов из титанового сплава ВТ3–1 после ГДУ. H_0 – исходная микротвёрдость. Рабочая среда – стальные шарики $\varnothing 2,5$ мм, давление рабочей жидкости 0,2 МПа

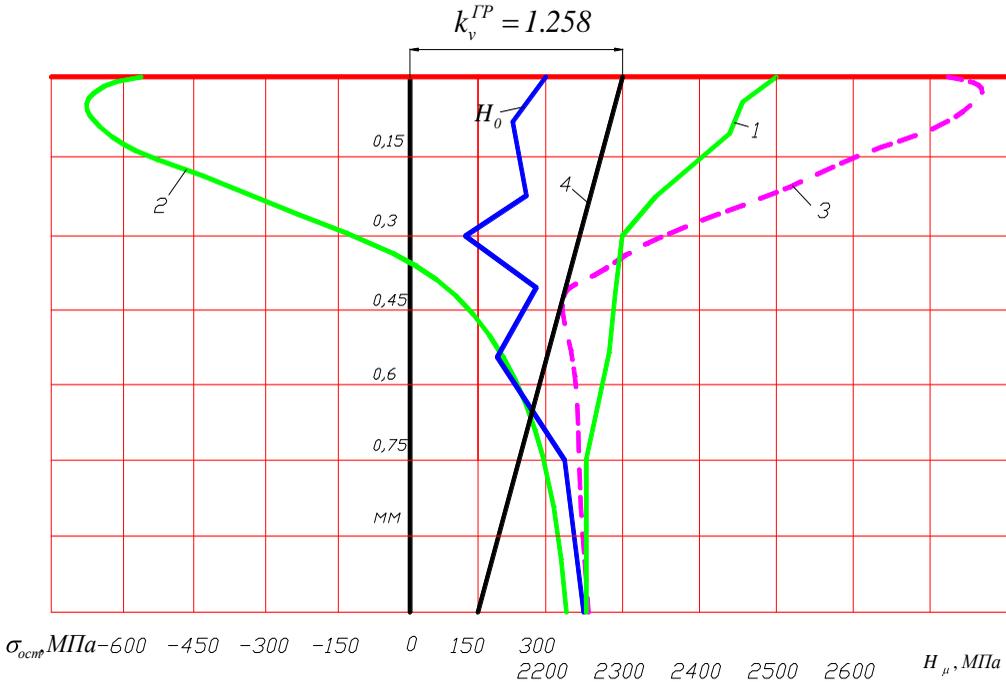


Рис.70. Результат графо–расчётного анализа определения коэффициента упрочнения образцов из сталь 40X после ВиУИО.

H_0 – исходная микротвёрдость

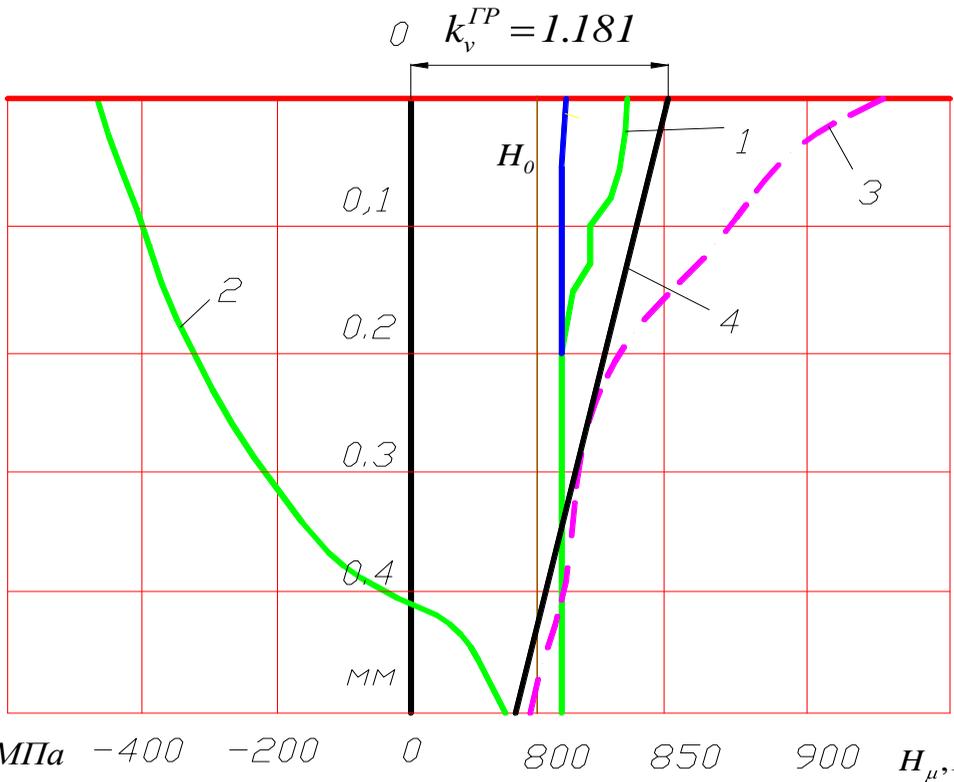


Рис.71. Результат графо–расчётного анализа определения коэффициента упрочнения образцов из сталь 30X3BA после ВиУ.
 H_0 – исходная микротвёрдость.



Т а б л и ц а 8 - Обоснование применимости расчётно–аналитической модели для оценки повышения усталостной прочности деталей, упрочнённых методами ППД

Метод обработки	Матриал	ΔH	$\sigma_{ост}^{пов.}$, МПа	h_{σ} , мм	h_H , мм	$k_v^{ГР}$	k_v^P	$k_v^{\mathcal{E}}$	$\delta^{ГР} = \frac{ k_v^{ГР} - k_v^{\mathcal{E}} }{k_v^{\mathcal{E}}}$ %	$\delta^{P.a.} = \frac{ k_v^{P.a.} - k_v^{\mathcal{E}} }{k_v^{\mathcal{E}}}$ %	Источник
ВиУО	30Х3ВА	1.025	-450	0.42	0.2	1.181	1.212	1.27	7.1	6.89	[]
ГДУ	ВТЗ–1	1.38	-580	0.155	0.055	1.309	1.335	1.48	11.55	9.79	[]
ВиУИО	Сталь 40Х	1.19	-570	0.37	0.75	1.258	1.245	1.36	7.5	8.46	[]



5 Характеристика динамических методов ППД и средств их технологического оснащения

Пневмодробеструйная обработка. Этот метод ППД является одним из первых методов упрочнения деталей сухой дробью. Он позволяет обрабатывать плоские детали, а также детали сложной конфигурации (зубчатые колеса, пружины, рессоры и др.). Применяется как для упрочнения всей поверхности детали, так и отдельных ее участков.

Упрочнение осуществляется на пневмодробеструйных установках, которые просты по конструкции. В них концентрированный поток дроби ($\varnothing 0,8...2$ мм) под давлением сжатого воздуха приобретает скорость $3...5$ м/с и через неподвижное или качающееся сопло направляется на неподвижно закрепленную или вращающуюся на шпинделе деталь. Недостатком этих установок является быстрый износ направляющих сопел, необходимость поддержания заданного давления воздуха, чтобы обеспечить стабильность процесса упрочнения, наличие системы сбора, очистки, подвода в зону обработки и отвода из нее деформирующих частиц, малые энергетические возможности, низкая производительность односопловых установок и значительное усложнение конструкции при изготовлении и эксплуатации многосопловых установок.

На рис.72 представлена промышленная установка типа БДУ – Э2М, используемая для местного упрочнения, а также формообразования деталей из листов и плит. Установка состоит из системы сбора 1, подачи 2 и очистки 5 дроби, рабочей камеры 10, соединенной с основными системами установки посредством двух рукавов: подачи дробевоздушной смеси 7 и отсоса дроби 6. Рабочая камера состоит из штуцера 8 и сопла 9, подающего дробь на поверхность заготовки 12 и полости разрежения 13, через штуцер 4 которой дробь отводится из камеры. Во избежание вылета дроби из камеры предусмотрено щеточное уплотнение 11. Установка смонтирована на тележке 3 и может транспортироваться. Деформирующие тела - дробь диаметром до 2 мм. Масса загружаемой дроби - до 100 кг.



Технология машиностроения

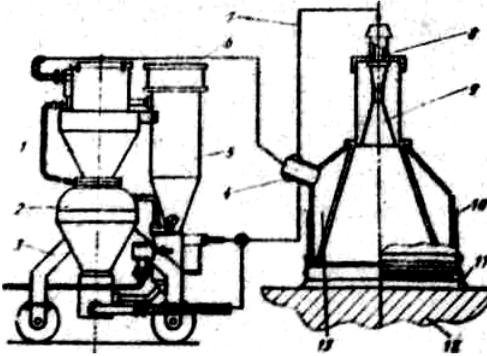


Рис.72. Дробеструйная установка БДУ – Э2М

Установка для упрочнения деталей сложной конфигурации (рис.73) представляет собой рабочую камеру 1, жестко закрепленную на сварной раме 2. Обрабатываемую деталь 3 устанавливают на осях карданного кольца 4 и приводят во вращение в двух плоскостях одновременно от двигателя 5, расположенного на кольце 4, и от двигателя 6 через редуктор 7 и цепную передачу 8. В нижней части камеры размещен аппарат 9 со щелевыми соплами, который также приводится во вращение от двигателя 6 через цепную передачу 10 и коническую зубчатую пару 11.

В качестве обрабатывающей среды используют стальные шарики из материала ШХ15 твердостью от HRC 62 до HRC 64, диаметром 2,5 мм. Диаметр шариков выбирают с учетом обработки поверхностей малым радиусом и обеспечения заданного параметра шероховатости поверхности.

На основе расчетно-экспериментальных исследований приняты следующие условия упрочнения: давление воздуха 0,4 – 0,6 МПа, время обработки соответственно при вращении и без вращении детали для алюминиевых сплавов 2,5 и 8 мин., для сталей 5 и 20 мин, для титановых сплавов 6 и 24 мин.; расстояние между соплом и обрабатываемой поверхностью 300 мм; диаметр сопла 0,03 м, масса шариков 4 – 6 кг.

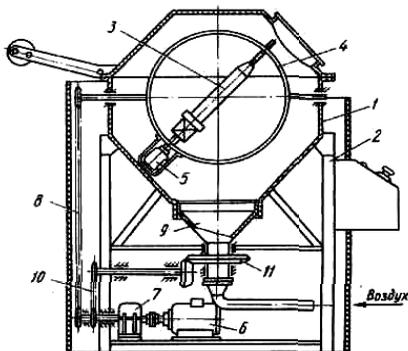


Рис.73. Пневмодробеструйная установка для упрочнения деталей сложной конфигурации

Дробеметная обработка. Дробеметная обработка – эффективный и распространенный технологический метод повышения выносливости и износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием. Сущность процесса заключается в том, что рабочая среда (дробь) поступает в быстро вращающийся ротор и выбрасывается лопатками на поверхность обрабатываемых деталей с большой скоростью (50...80 м/с). Дробеметные установки отличаются высокой производительностью (до 1300 Н/мин), применяются преимущественно в условиях массового производства для упрочнения зубчатых колес, рессор и других деталей машин.

Существует несколько типов дробеметных установок. Как показал опыт, более производительными и удобными для перемещения обрабатываемых изделий и автоматизации процесса являются установки с горизонтальным расположением оси вращения ротора, выбрасывающего дробь в вертикальной плоскости (рис.74).

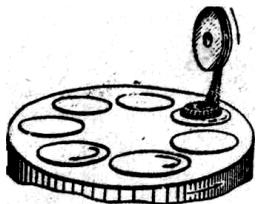


Рис.74. Схема обработки конических зубчатых колес на дробеструйной установке с вращающимся столом

Недостатками дробеметного упрочнения являются нагрев деформируемой поверхности (из-за жестких ударов летящих с большой скоростью дробинок), невысокая плотность потока дроби, что отражается на однородности и сплошности наклепа. В определенной степени эти недостатки устранены в



Технология машиностроения

новых установках дробеметного типа, осуществляющих упрочнение микрошариками диаметром 0,1...0,2 мм. Микрошарики подаются сверху во внутреннюю полость вала роторного колеса и разбрасываются плотным потоком через радиальные отверстия (щели) приобретая под действием центробежных сил скорость 40...100 м/с. Применение микрошариков вместо дроби позволяет более "плавно" регулировать степень упрочнения в труднодоступных местах (например, во впадинах зубьев).

Существенным недостатком дробеметных установок является громоздкость и сложность конструкции, высокая материалоемкость - и энергоемкость, вызванная наличием большого запаса дроби, введением в конструкцию крупногабаритных накопителей и систем транспортирования рабочей среды, неблагоприятные условия работы из-за наличия металлической пыли, находящейся во взвешенном состоянии, быстрый изгиб лопаток ротора.

Дробеметные аппараты 2М392 и 2М393 используют в большинстве ДМУ. Дробеметный аппарат 2М393М приводится во вращение через клиноременную передачу от электродвигателя мощностью 14 кВт. Вращение передается на вал шпинделя 13, который установлен на роликоподшипниках 11, размещенных в гильзе 12, закрепленной в корпусе 14. Гильза дает возможность быстро заменять ротор при ремонте. На концах вала закреплены шкив 15, рабочее колесо 8 и крыльчатка 7, изготовленная в виде полого цилиндра со сквозными пазами, заполняемыми дробью по мере поступления ее из патрубка 5 загрузочной воронки.

Рабочее колесо состоит из двух дисков с радиально расположенными лопастями 10, которые вставляют в пазы рабочего колеса с горца и крепят винтами 9. Рабочее колесо закрывают кожухом 1 с откидной крышкой 18. Изнутри кожух защищен сменными плитами 17 и листами резины 16, к нему крепят гнездо 6, распределительную камеру 2 и патрубок 5 загрузочной воронки. Зазоры между патрубками и распределительной камерой, а также между распределительной камерой и гнездом уплотнены резиновыми кольцами 3 и 4 и минимальны. При работе дробеметного аппарата дробь подается в воронку 19 и попадает в крыльчатку, закрепленную на одном валу с рабочим колесом. Из вращающейся крыльчатки дробь выбрасывается через окно в распределительной камере на лопасти 10 рабочего колеса. Под действием центробежных сил на очищаемую поверхность выбрасывается до 130 кг дроби в 1 мин со скоростью 80 м/с. При этом поток дроби



Технология машиностроения

имеет веерообразную форму с шириной факела дроби у ротора 60 мм, а его направление определяется расположением окна в распределительной камере.

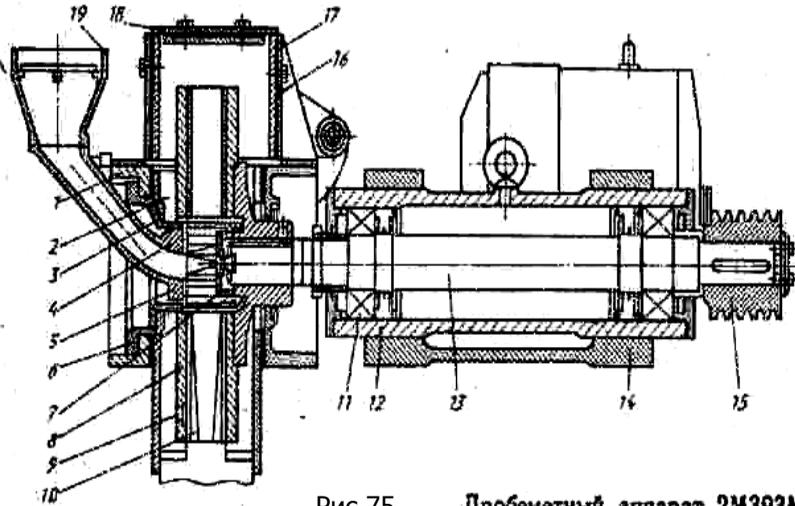


Рис.75. Дробеструйный аппарат 2М393М

По методу транспортирования деталей дробеструйное оборудование делят на ленточные барабаны периодического и непрерывного действия, вращающиеся столы, проходные и стационарные камеры.

Гидродробеструйная обработка. Сущность гидродробеструйного упрочнения (ГДУ) заключается в обработке шариками, эжектируемыми смазывающе-охлаждающей жидкостью. На рис.76 представлена принципиальная схема гидродробеструйной эжекторной установки (ГДЭУ).

Обрабатываемую деталь 1 устанавливают на шпинделе в камере 2, разделенной сеткой 3 на две полости А и Б. В сетке 3 помещена дробь (шарики), в полости Б – смазывающе-охлаждающая жидкость. В полости А установлено сопло-эжектор 4. В него насосом 5 подается струя смазывающе-охлаждающей жидкости, которая подхватывает дробь и направляет на обрабатываемую деталь, производя обработку поверхности детали. Отделенная от дроби сеткой 3 жидкость сливается по патрубки 6 в бак 7. Фильтр 8, расположенный в



Технология машиностроения

баке, отделяет мелкие частицы материала детали, образующиеся при "шелушении" поверхностного слоя, и изношенные дробинки, прошедшие через сетку 3. Затем насос 5 снова засасывает жидкость, и процесс продолжается.

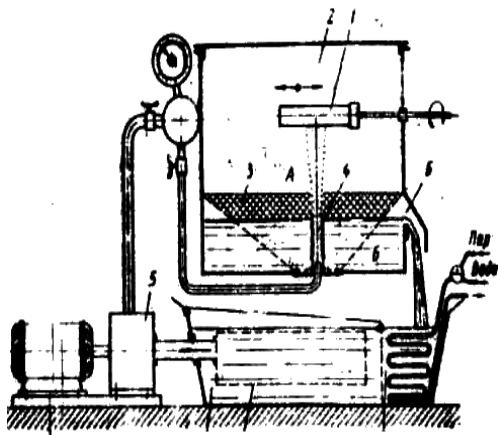


Рис.76.
Принципиальная
схема ГДЭУ

В практике применяются односопловые, многосопловые, а также многошпindleльные установки, которые в отличие от дробеструйных и дробеметных несложны по конструкции и имеют сравнительно небольшую металлоемкость.

Это обусловлено тем, что в эжекторной установке исключены системы транспортирования и сепарации дроби, так как эти функции выполняют сопла-эжекторы и разделительная сетка. Кроме того, в ГДЭУ исключены воздухоочистительные и воздухосушительные устройства. В качестве рабочей среды при ГДУ применяют шарики подшипников, стойкость которых при работе с трансформаторным маслом в тысячи раз выше, чем у дроби. ГДЭУ обладают высокой стабильностью режима упрочнения за счет поддержания с небольшими отклонениями постоянного давления жидкости, размеров шариков и заданного времени упрочнения с помощью реле времени, отключающего насос. Стойкость сопел ГДЭУ исчисляется годами при двух – трехсменной работе. Повышенная, стойкость объясняется отсутствием сухого трения частиц рабочей среды, как между собой, так и о поверхность детали, сопла и стенки камеры.

Процесс ГДУ характеризуется отсутствием металлической пыли во взвешенном состоянии, что делает его более



приемлемым по условиям работы.

Качество поверхностного слоя деталей, прошедших гидродробе-струйное упрочнение, выше, чем после упрочнения сухой дробью: остаточные напряжения только сжимающие; сравнительно низкая шероховатость ($R_a = 1,25...0,16$ мм) поверхности сохраняется, высокая ($R_a = 10...25$ мкм) повышается до $1,25...2,5$ мкм; микрогеометрия улучшается, так как радиусы закругления впадин и выступов, определяющих опорную поверхность, увеличиваются.

Недостатками процесса ГДУ является следующее: требуется промывка деталей; повышается степень пожарной опасности из-за образования паров во время работы ГДЭУ при применении в качестве рабочей жидкости масла.

Область применения ГДЭУ охватывает разнообразные типы деталей. В настоящее время на них уже упрочняются в серийном производстве такие детали, как лопатки компрессоров из титановых и алюминиевых сплавов, стальные шестерни, трубопроводы, пружины, режущие инструменты и др.

Пневмодинамическая обработка. Разновидностью пневмодробеструйной обработки является пневмодинамическая обработка. Сущность ее заключается в том, что в изолированном объеме (камере) расположено определенное число шариков, которые под действием струи сжатого воздуха находятся в постоянном движении: в центральной части камеры они разгоняются до скорости $12 - 15$ м/с, упрочняют поверхность и затем скатываются назад, в нижнюю часть камеры, где снова захватываются струей воздуха. Камера соединена с кареткой и перемещается по поверхности обрабатываемой детали, последовательно проходя все ее участки. Изменяя давление воздуха (от $0,3$ до $0,7$ МПа), продольную подачу рабочего органа (от 10 до 100 мм/мин), диаметр шариков (от 1 до 3 мм) и массу загружаемых шариков, можно создавать заданный режим упрочнения. Устройства такого типа используют для обработки гладких поверхностей большой длины.

Пневмодинамической обработкой упрочняют также отдельные наиболее нагруженные участки деталей: радиусные сопряжения поверхностей; галтельные переходы поверхностей тел вращения; плоские участки поверхности; поверхности отверстий произвольной формы размером $14 - 350$ мм при длине не более 100 мм;

необработанные места крепления деталей (под прижимами), упрочненных вибрационной, ударно-барабанной, дробеструйной или гидродробеструйной обработкой; места поверхности



Технология машиностроения

деталей, на которых упрочненный слой снят при подгоночных работах.

В зависимости от особенностей деталей и их конфигурации для местного пневмодинамического упрочнения используют специальные камеры и различную оснастку.

В отличие от выше рассмотренных способов упрочнения дробью этот способ не требует дробепроводящих узлов и деталей, подвергающихся быстрому износу при эксплуатации (сопла, лопасти роторов), и не имеет потерь рабочих частиц.

Возможность широкого регулирования режимов ведения процесса упрочнения (давление воздуха, диаметр и общая масса находящихся в камере шариков и т.д.) позволяет получать различные значения кинетической энергии движущихся шариков и времени удара об обрабатываемую поверхность.

Пневмодинамическая обработка может осуществляться устройствами двух типов – разгонного и хаотического.

В устройствах разгонного типа движение деформирующих тел характеризуется определенной направленностью, совпадающей с направленностью воздушного потока. В устройствах хаотического типа отсутствует определенная направленность движения деформирующих тел.

Разгонные пневмодинамические устройства (рис.77) по конструктивному исполнению могут быть "пистолетного" типа – с камерой, расположенной на консоли по отношению к держателю, или "гладильного" с камерой, расположенной на одной оси с держателем.

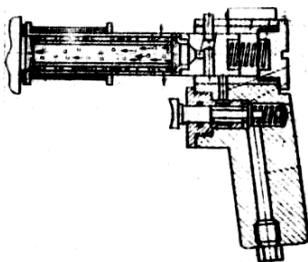


Рис.77. Схема односоплового пневмодинамического устройства «пистолетного» типа

В устройствах этого типа длина канала разгона выбирается из конструктивных соображений в пределах 50...100 мм. При длине канала разгона до 100 мм скорость соударения шариков с поверхностью детали может достигать 20...25 м/с.



Применяют эти устройства для местного упрочнения.

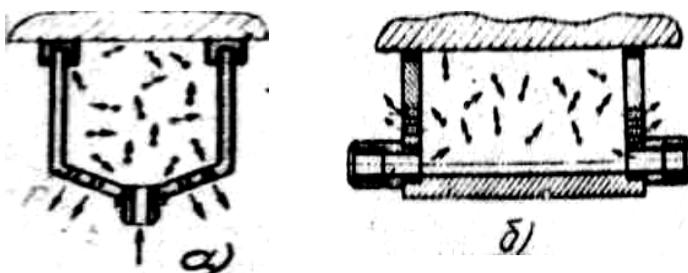


Рис.78. Пневмодинамическое устройство хаотического типа

В устройствах хаотического типа движение деформирующихся тел не подчиняется видимой закономерности, оно носит вероятностный характер. Такие устройства могут быть с односторонним (рис.78.а) или многосторонним (рис.78.б) подводом сжатого воздуха. Преимуществом пневмодинамических устройств хаотического типа перед разгонными является чрезвычайная простота их конструкции, однако коэффициент полезного действия данных устройств невелик, так как скорость рабочих частиц составляет 4...8 м/с.

Используемый в пневмодинамическом методе принцип закрытого объема, обеспечивающий многократное использование каждого из рабочих шариков, позволяет достигать необходимой плотности потока и полного покрытия поверхности следами ударов незначительным количеством шариков.

Обработка поверхностей объемных деталей производится в основном устройствами хаотического типа с использованием двух технологических приемов: набором отдельных рабочих камер, заключенных по всему периметру детали (три-четыре камеры) в общий корпус (для случая обработки детали по форме, отличной от тела вращения), и вращением детали в рабочей зоне одной камеры (для обработки деталей типа валов, цилиндров).

К числу недостатков пневмодинамического метода следует отнести небольшую производительность и ограниченное применение. Наиболее рациональной областью применения этого метода является пневмодинамическая обработка длинномерных деталей постоянного сечения, небольших внутренних полостей; плоских или близких к плоским плавных поверхностей, а также местное упрочнение различных по



конфигурации поверхностей.

Ударно – барабанная обработка. Ударно-барабанный способ обработки применяется для изменения состояния обрабатываемых поверхностей без существенного изменения формы и размеров изделий.

В процессе ударно-барабанной обработки обеспечивается: упрочнение поверхностного слоя, что повышает циклическую прочность и ресурс изделий; уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности, что способствует устранению концентраторов напряжений, улучшению эксплуатационных характеристик и внешнего вида изделий.

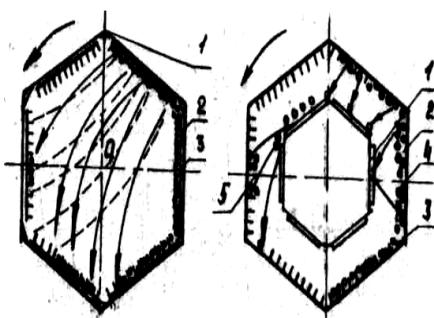


Рис.79. Схемы ударно – барабанной обработки: 1 – барабан; 2 – частицы рабочей среды; 3 – обрабатываемые детали; 4, 5 – ricoшетирующие потоки частиц

Суть процесса ударно-барабанной обработки заключена в следующем. В полости барабана находятся сыпучие рабочие частицы (например, дробь). Барабану сообщается такая скорость вращения вокруг его горизонтальной или наклонной оси, которая обеспечивает отделение частиц рабочей среды от поверхности барабана под действием силы тяжести частиц и дальнейшее их движение в полости барабана по баллистической траектории до соударения с обрабатываемой поверхностью изделий, закрепленных на стенках барабана (рис.79). Энергию единичного соударения можно изменять в весьма широких пределах путем изменения массы частиц и скорости их соударения с обрабатываемой поверхностью.

В зависимости от обрабатываемого материала и желаемого эффекта обработки в качестве рабочей среды могут использоваться металлические шарики или дробь сферической, округленной или граненой формы.

К преимуществам ударно-барабанной обработки можно отнести: высокую производительность за счет одновременной обработки нескольких деталей; простоту, надежность и боль-



шой срок службы установки; стабильность режимов обработки; универсальность установки, пригодность ее для обработки разнообразных крупногабаритных деталей.

Наиболее рационально этим способом обрабатывать крупногабаритные детали типа панелей, поясов лонжеронов, балок, а также крупногабаритные наружные и внутренние поверхности вращения. Ориентировочные габаритные размеры барабанов: диаметр 2...5 м, длина 3...12 м, число оборотов барабана 10...25 в мин., скорость соударения частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью 2...10 м/с.

В качестве недостатков ударно-барабанного метода обработки можно отметить: большую одновременную потребность в рабочей среде; низкие энергетические возможности частиц рабочей среды; высокую материалоемкость и энергоемкость оборудования; невозможность обработки малых внутренних полостей.

Ударно-импульсная обработка. Сущность ударно-импульсной обработки (УИО) заключается в периодическом ударно-импульсном воздействии на обрабатываемую поверхность всей массы частиц рабочей среды, загружаемой в устройство (рис.80). В качестве рабочей среды используются стальные или алюминиевые шарики. Рабочая среда 1 загружается в камеру 2 и размещается на жесткой площадке 3, соединенной шарнирно или посредством гибкого элемента 4 с механизмом возвратно-поступательного движения 5. Над жесткой площадкой располагается обрабатываемая деталь 6. При движении площадки вверх вместе с ней начинает перемещаться рабочая среда. В момент достижения площадкой максимальной мгновенной скорости частицы рабочей среды отрываются от нее и движутся к детали. После соударения с поверхностью детали они возвращаются на площадку, которая к этому моменту уже заняла свое исходное положение, и процесс повторяется вновь. Уровень кинетической энергии определяется скоростью перемещения площадки, которая в свою очередь, зависит от кинематики механизма возвратно-поступательного действия и может достигать 10...15 м/с.

В отличие от существующих динамических методов ППД свободнодвижущимися частицами УИО характеризуется: наибольшей плотностью соударения частиц рабочей среды с поверхностью; высоким коэффициентом передачи кинетической энергии от частиц к детали; применением устройств с относительно небольшими габаритными размерами, их малой



Технология машиностроения

материало – и энергоемкостью; широким диапазоном регулирования скоростей; удовлетворительными условиями труда.

Указанные преимущества достигаются за счет того, что способ УИО позволяет: производить обработку всей детали незначительной по объему массой частиц рабочей среды путем многократного ее использования; обеспечить высокую компактность соударения всей массы рабочей среды с обрабатываемой поверхностью; предотвратить возникновение встречного демпферного слоя между деталью и движущейся к ней массой частиц рабочей среды путем синхронизации циклов движения площадки и рабочей среды; исключить из конструкции установок вспомогательные устройства, обеспечивающие сбор и подачу в зону рабочей среды; достаточно просто и надежно герметизировать рабочую зону обработки.

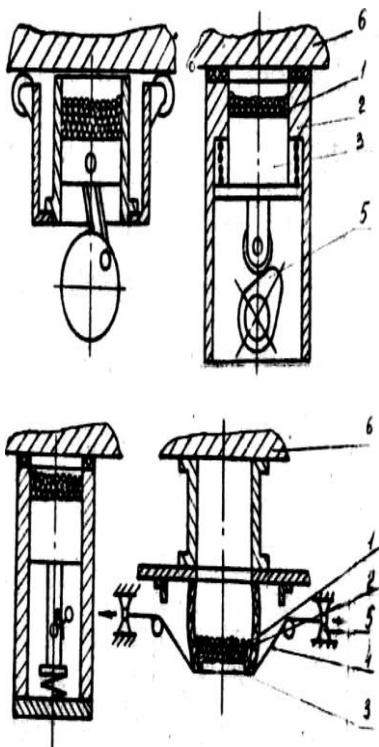


Рис.80. Варианты устройств для ударно-импульсной обработки

Существенным недостатком устройств для УИО является ограниченный ресурс рабочих элементов устройств, вы-



званный быстрым изнашиванием трущихся пар.

Качество поверхностного слоя, формируемое в процессе УИО, характеризуется улучшенной микрогеометрией, наведенными в нем на глубине до 1 мм остаточными сжимающими напряжениями, степенью упрочнения 10...25%. Ударно – импульсная обработка позволяет повышать усталостную долговечность деталей в 3...5 раз, износостойкость на 10...20% по сравнению с неупрочненными.

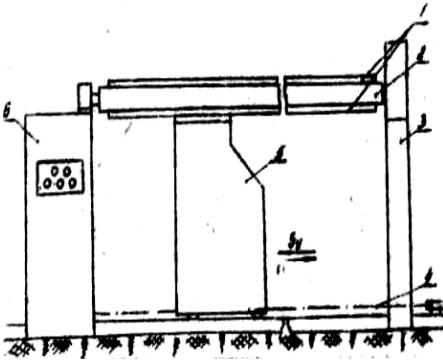


Рис.81. Принципиальная схема установки для ударно-импульсной обработки крупногабаритных плоских деталей: 1-деталь; 2-платформа; 3-стойка; 4-трос; 5-устройство для вибрационной ударно-импульсной обработки; 6- пульт управления

Область применения УИО может охватывать широкую номенклатуру изделий, но предпочтительнее его использовать для упрочнений плоских или имеющих большой радиус кривизны деталей. Наиболее экономически выгодно и технически целесообразно применение УИО для упрочнения крупногабаритных длинномерных деталей (5 м и более). Эффективность использования рассматриваемого метода для обработки такого типоразмера деталей обуславливается возможностью создания на его основе установки проходного типа (рис.81), обработка в которой происходит при относительном перемещении детали и устройства.

Вибрационная ударная обработка. Вибрационная ударная обработка (виброгалтовка) – это ППД соударением незакрепленных или закрепленных заготовок и рабочих тел в замкнутом объеме при их перемещении, вызванном колебательным движением рабочего органа.

Процесс сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Удары вызваны действием направленных вибраций сообщаемых рабочей камере, в которой



размещены обрабатываемые детали и рабочая среда (рис.82).

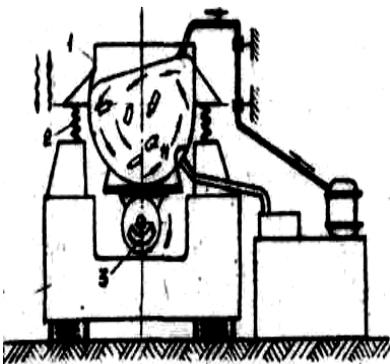


Рис.82. Схема вибрационной установки: 1-рабочая камера; 2-пружина; 3-вал с несбалансированными грузами; 4-станина

Рабочая камера подвергается вибрации от инерционного вибратора. В процессе вибрирования детали и рабочая среда непрерывно подвергаются переменным по знаку ускорениям. Рабочая среда и обрабатываемые детали относительно перемещаются, совершая два вида движений: колебание и медленное вращение всей массы (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые передают ее следующим слоям, и т.д.

В качестве рабочих сред широко применяются стальная и чугунная дробь, литые звездочки, рубленая проволока, стальные полированные шарики и др.

Основой вибрационного ударного упрочнения является динамический характер протекания процесса, сопровождаемый множеством микроударов частиц рабочей среды по поверхности, обрабатываемых деталей и обеспечивающий пластическое деформирование поверхностного слоя, следствием чего является повышение микротвердости, образование сжимающих остаточных напряжений первого рода и уменьшение шероховатости поверхности.

Виброударное упрочнение является универсальным методом упрочняющей работы. Наиболее наглядно его преимущества проявляются при обработке деталей сложной формы, а также при упрочнении большой партии деталей небольших размеров.

Интенсивность виброударной обработки зависит от режимов и продолжительности обработки, характеристик и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей каме-



ры и степени ее заполнения, механических свойств обрабатываемых деталей.

К недостаткам рассматриваемого метода можно отнести следующие: при обработке крупных деталей большая единовременная потребность в рабочей среде; малый ресурс установок; потребность во вспомогательных устройствах для сортировки и промывки рабочей среды; необходимость отдельного помещения для размещения оборудования из-за повышенного уровня шума.

Виброударную обработку выполняют на специальном оборудовании – вибрационных станках, которые называют также вибрационными машинами. Типовой вибрационный станок состоит из основания, на котором смонтирована рабочая камера с вибратором, опирающаяся на упругие элементы, привода вибратора, эластичной муфты, бака отстойника и системы циркуляции жидкости (при работе «сухим» способом вместо жидкости применяют сжатый воздух).

Центробежно–шариковая обработка. На практике получают все более широкое распространение методы упрочняющей обработки металлов, основанные на динамическом действии (ударе) инструмента на обрабатываемую поверхность. К этим методам относится чеканка, обработка вибрирующими роликами и шариками, центробежно-шариковая обработка и др.

Ударно-центробежное упрочнение, используемое в основном для повышения контактной и усталостной прочности наружных цилиндрических и плоских поверхностей, осуществляется за счёт множества соударений с деталью шариков, установленных в радиальных отверстиях вращающихся дисков. Схема процесса ударно – центробежного упрочнения представлена на рис.83 деталь 1 совершает вращение с оборотами n_d . Инструмент – диск 2 совершает вращение с оборотами n_i и перемещается вдоль обрабатываемой поверхности детали с подачей S_z . Под действием центробежных сил инерции шарики занимают крайнее положение наибольшего радиуса в каналах отверстий, образуют с поверхностью детали натяг H .

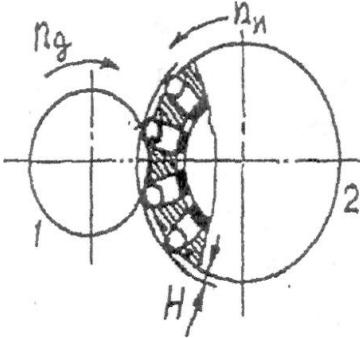


Рис.83.Схема ударно-центробежного упрочнения

В результате этих перемещений шарики поочерёдно соударяются с поверхностью детали, образуя на ней множество локальных пластических отпечатков. Режимы упрочнения выбраны такими, что пластические отпечатки перекрывают друг друга, образуя регулярный микрорельеф с равномерно упрочнённой поверхностью. Для ударно-центробежного упрочнения сталей рекомендуются скорости детали $V_d = 30 - 90$ м/с, инструмента $V_{ш} = 8 - 40$ м/с; продольная подача $S_z = 0,02 - 0,2$ мм/об; диаметр шарика $d_{ш} = 5 - 15$ мм. При исходном параметре шероховатости $Ra 20 - 5$ мкм за счёт ударно-центробежного упрочнения можно добиться $Ra 1,25 - 0,6$ мкм; при исходном значении $Ra 0,63 - 0,32$ мкм достигается $Ra 0,2 - 0,1$ мкм. Повышение микротвёрдости за счёт ударно - центробежного упрочнения для сталей достигает $30 - 45$ % при глубине наклёпа до $0,6 - 0,8$ мм. Остаточные напряжения имеют сжимающий характер и достигают $650 - 750$ МПа. Усталостная долговечность возрастает в $1,5 - 3$ раза.

Ударное раскатывание осуществляется за счёт соударений роликов раскатника с поверхностью отверстия. Радиальное импульсное перемещение роликов и в ряде случаев осевое импульсное перемещение осуществляется за счёт специально спрофилированных кулачков. Припуск на ударное раскатывание составляет: для стали - $0,015$ мм; бронзы и латуни - $0,020$ мм; чугуна - $0,025$ мм, алюминиевых сплавов - $0,032$ мм. Рекомендуемая скорость раскатывания $100-200$ м/мин, исходная шероховатость составляет $Ra 0,63 - 0,32$ мкм, а достигаемая шероховатость $Ra 0,08 - 0,04$ мкм. В результате ударного раскатывания создаётся наклёп, формируются сжимающие остаточные напряжения. В результате локализуется вредное воздействие отверстий как концентраторов напряжений, повышается усталостная долговечность деталей, содержащих отверстия.

Центробежно-шариковый наклёп осуществляется при



Технология машиностроения

помощи центробежных (ротационных) упрочнителей, принцип которых основан на использовании кинетической энергии стальных шариков диаметром 7...12мм, свободно перемещающихся в гнездах вращающегося ротора. При вращении ротора шарики, встречая на своем пути обрабатываемую поверхность заготовки, движущейся навстречу со скоростью 30...90 м/мин, наносят по ней удар и отталкиваются в глубь гнезда.

В качестве оборудования применяют токарные, шлифовальные и другие станки, как общего, так и специального назначения.

Метод применяют в основном для повышения сопротивления усталости деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. При правильно назначенных условиях и режимах упрочнения с помощью этого метода удастся повысить сопротивление усталости обработанных деталей в 1,5 – 4 раза.

Режимы процесса центробежно-шариковой обработки характеризуются окружной скоростью упрочнителя, натягом, количеством шариков в сепараторе и их диаметром, окружной скоростью заготовки, величиной продольной подачи, количеством проходов.

Необходимый натяг обеспечивается установкой упрочнителя на определенном расстоянии от заготовки при помощи поперечного винта суппорта или столе станка.

В качестве упрочнителя может быть использована ротационная головка с роликами, установленными по винтовой линии подобно зубьям двухзаходной червячной фрезы.

При центробежно – шариковом упрочнении металлов невысокой твердости глубина наклепанного слоя достигает 1,5 мм и уменьшается с увеличением исходной твердости металла. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое достигает 800 МПа. Твердость повышается на 50%, шероховатость поверхности увеличивается, размер заготовки практически не меняется.

Центробежно-шариковый наклеп применяют для окончательной обработки поверхностей коленчатых валов, гильз цилиндров, поршневых колец, вкладышей подшипников и других деталей.

Обработка вибрационными эксцентриковыми и ультразвуковыми упрочнителями. Центробежно-шариковые упрочнители при наклепывании детали основную силу удара шарика передают в направлении касательной к поверхности, обрабатываемой заготовки. В результате этого



Технология машиностроения

поверхностный слой металла деформируется и смещается в тангенциальном направлении. При таком, характере деформирования недостаточно точно назначенный режим обработки может вызвать нарушение целостности поверхностных слоев металла, а в ряде случаев – нарушение поверхностного слоя.

В настоящее время разработан новый способ динамического наклепа поверхностного слоя металла, при котором сила удара шарика об обрабатываемую поверхность обеспечивается инерционной эксцентриковой массой. При этом в зависимости от необходимости удар деформирующего шарика можно осуществлять в разных направлениях: нормальном, тангенциальном (окружном), осевом и в любом промежуточном направлении.

Если при обработке статическими методами ППД (обкатывание шаром или роликом, алмазное выглаживание, поверхностное дорнование и т.д.) инструменту сообщают дополнительно ультразвуковые колебания с частотой 18—24 кГц и амплитудой 15 – 30 мкм, то они становятся ударными методами (ультразвуковое обкатывание, ультразвуковое выглаживание и т. д.) (рис.84.а).

Используют также ультразвуковую обработку, когда загружаемым рабочим телам, помещенным в замкнутом объеме вместе с обрабатываемой деталью, сообщают ультразвуковые колебания, под воздействием которых происходит упрочнение обрабатываемой поверхности. Процесс (рис.84.в) напоминает виброударную обработку. Деталь 1 устанавливают в специальную камеру 3, где размещают также стальные шарики 4. Ультразвуковое поле создают ультразвуковым преобразователем 5 и концентратором 6. Зазоры между камерой 3 и концентратором 6 выбирают меньшим диаметра шариков 4. В зону обработки периодически впрыскивают небольшое количество жидкости. Оптимальные условия обработки выбирают, изменяя интенсивность ультразвукового поля, диаметр и число шариков.

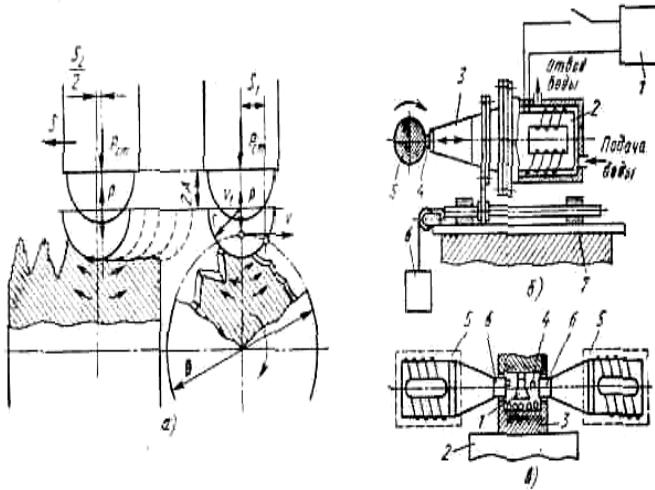


Рис.84. Схема ультразвукового упрочнения: а – характер взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью в направлении подачи и скорости; P – ударная сила; $P_{ст}$ – статическая сила; A – амплитуда смещения рабочей части инструмента; g – радиус сферы рабочей части инструмента; S – продольная подача; S_1 – относительная подача за один период колебаний инструмента; S_2 – продольная подача за один период колебаний; v – окружная скорость заготовки; v_1 – колебательная скорость рабочей части инструмента; D – диаметр обрабатываемой детали; б – схема УЗО наружных цилиндрических поверхностей; 1 – ультразвуковой генератор; 2 – магнитострикционный преобразователь; 3 – концентратор; 4 – рабочая часть ультразвукового инструмента; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – груз; 7 – направляющие; в – схема устройства для ультразвукового упрочнения стальными шариками; 1 – обрабатываемая деталь; 2 – стол; 3 – камера; 4 – стальные шарики; 5 – магнитострикционный преобразователь; – концентратор

При обычном ультразвуковом упрочнении инструмент 4 (рис.84.б) под действием статической и значительной ударной силы, создаваемой колебательной системой (ультразвуковым генератором 1, магнитострикционным преобразователем 2 и концентратором 3), пластически деформирует поверхностный слой обрабатываемой детали 5. Статическую силу $P_{ст}$ можно приклады-



Технология машиностроения

вать с помощью пружины или, например, груза 6, под действием которого все устройство может свободно перемещаться по направляющим 7 и поджиматься к детали 5.

По сравнению, например, с обкатыванием шаром (ОШ) ультразвуковая обработка (УЗО) отличается следующими особенностями и преимуществами:

1. Инструмент пластически деформирует поверхностный слой детали импульсно, с большой интенсивностью колебаний, в результате чего деформирование сопровождается прерывистым и интенсивным трением.

2. Кратность приложения силы при деформировании инструментом поверхности – 400 раз и более (при ОШ 12 – 20 раз).

3. Статическая сила, действующая на деталь, незначительна.

4. Скорость деформирования – переменная, ее максимальное значение 200 м/мин и более, что превышает скорость деформирования при ОШ в десятки и сотни раз.

5. Среднее давление, создаваемое в поверхностном слое детали под действием нормально направленной силы, в 3 – 9 раз больше, чем при обкатывании шаром.

6. Энергия, расходуемая на искажения кристаллической решетки и идущая на внутренние микроструктурные преобразования, при УЗО значительно выше, чем при ОШ.

7. Температура места контакта инструмента с деталью в зоне деформирования 100 – 150 °С, что в 3 – 5 раз меньше, чем при ОШ. Время нагрева при УЗО очень мало (3×10^{-5} с) и поэтому не наблюдается снижения упрочнения, вызываемого действием высокой температуры.

8. В процессе УЗО вследствие относительно больших напряжений и многократного приложения нагрузки напряженно-деформированное состояние специфично. Множественное скольжение дополнительно тормозит дислокации. Плотность дислокаций и дисперсность блоков намного больше, чем при ОШ. В результате степень наклепа повышается в 1,2 – 1,5 раза и соответственно увеличивается уровень остаточных сжимающих напряжения по сравнению с уровнем этих напряжений при ОШ.

Однако упрочнение путем УЗО не нашло достаточно широкого применения вследствие сложности применяемых устройств; необходимости использования ультразвуковых генераторов, которые занимают значительные производственные площади; большого расхода энергии; необходимости создания систем циркуляции охлаждающей воды и т. д. Дополнительный эффект



Технология машиностроения

упрочнения, создаваемый благодаря ультразвуковым колебаниям, не всегда окупает больших дополнительных затрат.

К параметрам режима УЗО относятся: статическая сила, амплитуда колебаний инструмента, радиус его скругления, частота колебаний, эффективная масса инструмента, продольная подача, число рабочих ходов, скорость обрабатываемой детали.

В качестве инструмента при УЗО используют стальные закаленные шары, которые устанавливают неподвижно или так, что они могут вращаться, а также гладилки из сверхтвердых материалов или алмазные выглаживатели.

Инструмент устанавливают в концентратор, от которого ему передаются ультразвуковые колебания.

Инструмент и концентратор – наиболее важные элементы колебательной системы. Рабочая часть инструмента в процессе эксплуатации под действием ударных и тепловых импульсов изнашивается. Это ухудшает качество поверхностного слоя обрабатываемых заготовок и снижает производительность. Стойкость инструмента из твердых сплавов (ВК8) в несколько раз больше стойкости инструмента из подшипниковой стали.

Форма и размеры концентратора определяются формой и размерами обрабатываемой заготовки. Для УЗО наружных поверхностей применяют прямолинейные концентраторы, для внутренних поверхностей — криволинейные концентраторы. По форме образующей различают ступенчатые, конические и экспоненциальные концентраторы. Концентратор изготавливают из углеродистой или инструментальной стали, обтачивают до получения параметра шероховатости $Ra = 0,8 \dots 1,6$ мкм, затем полируют или подвергают упрочняющей обработке. Амплитуда колебаний инструмента обычно ограничивается усталостной прочностью материала концентратора. Более высокую амплитуду имеют концентраторы, изготовленные из легированных сталей и титановых сплавов. Упрочняющая обработка, особенно УЗО, весьма существенно улучшает характеристики концентратора.

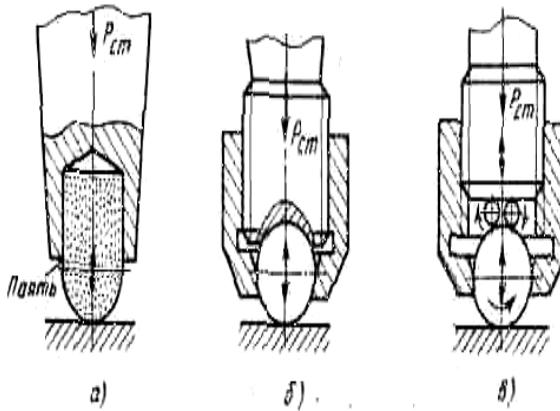


Рис.85. Схемы крепления инструмента: а,б – жесткое;
в – с обеспечением качения

Для УЗО требуются ультразвуковой генератор, магнитострикционный преобразователь, станок и приспособление, фиксирующее преобразователь на суппорте станка. С помощью магнитострикционного преобразователя электрическая энергия ультразвуковой частоты преобразуется в механическую энергию той же частоты.

Для УЗО некоторых деталей массового производства применяют специальные станки.

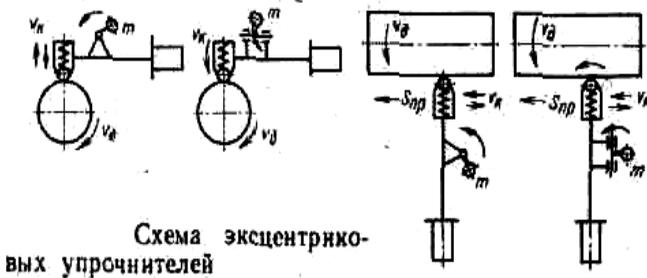
Упрочняющая чеканка. Сущность способа упрочнения чеканкой заключается в том, что с помощью специального приспособления (механического, пневматического и электро-механического типа) наносят удары по упрочняемой поверхности. В результате удара инструмента (ударника с бойками) изменяется качество поверхности, и в тонком поверхностном слое создаются остаточные напряжения сжатия до 1000 МПа. Шероховатость поверхности обычно I60...40 мкм. Глубина наклепа при чеканке может быть получена до 35 мм. Твердость поверхности, обработанной чеканкой, на 30...50% выше твердости исходной заготовки. Для достижения низкой шероховатости поверхности после чеканки следует предусмотреть механическую обработку на глубину до 0,5 мм или сглаживающие проходы по галтелям бойками увеличенных радиусов.



Технология машиностроения

В качестве инструмента для ударной чеканки применяют сферические, эллипсные или специальной формы бойки, ролики, а также шары из высокопрочной инструментальной стали или сверхтвердого материала. Частота ударов обычно лежит в пределах 10—50 Гц. Принцип чеканки напоминает принцип ультразвукового упрочнения, однако при чеканке частота колебаний инструмента на два порядка меньше, а его перемещение и энергия отдельных ударов – больше, чем при ультразвуковом упрочнении. Характер формирования упрочненной поверхности (в виде прилегающих друг к другу лунок) после ударной чеканки тот же, что и после центробежного упрочнения.

Помимо устройств, в которых подпружиненный боек перемещается кулачковым механизмом, для ударной чеканки используют вибрационные эксцентриковые упрочнители, принцип работы которых заключается в том, что инструменту сообщают вынужденные колебания с частотой вращения эксцентриковой массы. Амплитуда колебаний и сила удара инструмента зависят от соотношения масс эксцентрика и колеблющейся части вибрационной головки, массы эксцентрика и расстояния его центра тяжести от оси вращения.



Исследования показывают, что соответствующим подбором режимов чеканки (шаг, количество проходов, скорость и энергия удара бойка) можно достигнуть равнопрочности ступенчатого вала в галтелях и гладкой части и повысить несущую способность валов в 1,5 раза и более.

Способ упрочнения чеканкой наиболее эффективен и экономически выгоден (по сравнению с обкаткой роликами и шариками) при упрочнении таких элементов деталей машин, как галтели, сварочные швы и др. Как правило, чеканкой упрочняют крупные детали типа коленчатых валов, штоков, направляющих колонн для термомпрессовых автоматов. С



помощью этого метода можно упрочнять и профильные поверхности (резьбы, шлицы, зубья зубчатых колес), а также сложные поверхности, которые другими методами обрабатывать трудно или неэффективно.

Обработка многоконтakтным виброударным инструментом. Характерным представителем группы методов обработки многоконтakтным виброударным инструментом (МКВиУИ) можно назвать обработку шарико – стержневым упрочнителем (ШСУ). На рис.87 представлена схема этого процесса. Обработка осуществляется инструментом, состоящим из корпуса 3, в котором размещены пучок стержней 2 и стальные шары 1. Последние плотно прижаты к стержням поршнем 5 с помощью пружины 6. Гайка 4 является замыкающим элементом этой системы, направляющей штока поршня 5 и упором пружины 6. В рабочем состоянии стержни прижаты к обрабатываемой поверхности.

Конструкция инструмента обеспечивает обработку широкого спектра форм и размеров поверхностей и может последовательно обрабатывать отдельные участки детали. Принцип действия основан на прямой передаче ударного импульса к поршню 5 и далее, через среду стальных шаров на упрочняющие стержни (инденторы) и поверхностный слой детали. Ударник, среда шаров и инденторы размещены в корпусе 3. Инструмент снабжен зажимным устройством для удержания от выпадания пакета инденторов в нерабочем состоянии. В качестве источника ударных импульсов используются пневматические, гидравлические или механические ударники (возможно применение и электромагнитных виброударных устройств).

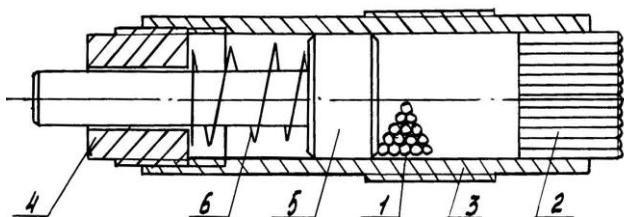


Рис.87. Схема многоконтakтного виброударного инструмента-шарико-стержневого упрочнителя (ШСУ)

В зависимости от конструктивных особенностей обрабатываемой детали созданы модификации инструмента: с



Технология машиностроения

цилиндрическим, прямоугольным, шестигранным корпусом, с корпусом, обеспечивающим передачу ударного импульса под углом к обрабатываемой поверхности.

В ряду многоконтактных виброударных инструментов для упрочняющей обработки ШСУ стоит между инструментом для чеканки и виброударной обработкой в уплотненной среде. Принципиальной особенностью ШСУ является наличие в конструкции гибкой связи между источником ударных импульсов и деформирующим элементом, позволяющей расширить технологические возможности обработки по сравнению с чеканкой, сохранив при этом достаточно высокий к.п.д. передачи энергии единичного удара на уровне величины, обеспечивающей формирование пластического отпечатка.

Конструкция ШСУ состоит из двух узлов: источника ударных импульсов и самого упрочнителя. В качестве источника ударных импульсов могут быть использованы стандартные пневмо – и электромагнитные ударники, а также специальные виброударные устройства. В существующих конструкциях в качестве источников ударных импульсов используют клепальные пневмомолотки различных типов.

Классическая конструкция упрочнителя включает корпус 1, упаковку стальных стержней со сферически заточенными концами 2, среду закаленных стальных шаров 3 и массивный боек 4 (рис.88).

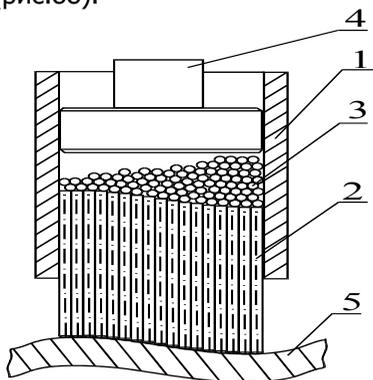


Рис.88. Схема многоконтактного виброударного инструмента ШСУ: 1 – корпус; 2 – стержни; 3 – стальные шары; 4 – боек; 5 – деталь

В конструкции многоконтактного виброударного инструмента (ШСУ), используется явление передачи ударного импульса от массивного ударника 4, обычно приводимого в движение пневмомолотком, через замкнутый объем закаленных стальных



Технология машиностроения

шаров 3 упаковке стержней со сферическими наконечниками 2, которые и воздействуют на обрабатываемую поверхность 5.

Ударник, получивший ударный импульс в направлении обрабатываемой поверхности, передает его шарикам, а те, в свою очередь, стержням. После взаимодействия с поверхностью стержни получают импульс отдачи, передают его шарам, шары – ударнику, ударник – бойку. Затем процесс продолжается по той же схеме.

Замкнутый объем стальных шаров обеспечивает гибкость связи ударник – упаковка стальных стержней.

Благодаря свойству псевдотекучести объема шаров при виброударном воздействии геометрическое место сферических вершин стержней может деформироваться, принимая форму обрабатываемой поверхности (сферы, цилиндра и др.).

Упаковка (пучок) стальных стержней – многоинденторная система (МИС) может иметь различную форму. Наиболее широко используются круглый, шестигранный и прямоугольный пучок.

Форма и размеры пучка определяются конструктивными особенностями и размерами обрабатываемой детали, а также физико-механическими характеристиками ее материала. С размерами пучка тесно связано количество стержней и размеры их поперечного сечения. Эти параметры пучка определяются характеристиками формируемого на поверхности микрорельефа (например, регулярный, частично регулярный или стохастический микрорельеф).

Форма заточки рабочей части индентора соответствует требуемому средневероятностному радиусу впадины стохастического микрорельефа или форме лунок регулярного микрорельефа.

В классическом варианте ШСУ форма поперечного сечения – круг. Это связано с необходимостью минимизации потерь энергии на трение, кроме того, такая форма увеличивает степень гибкости инструмента. Однако при определенных условиях могут применяться инструменты с квадратной или шестиугольной формой поперечного сечения инденторов. Такая форма обеспечивает более точное взаимное расположение центров пластических отпечатков на обрабатываемой поверхности, но в то же время снижает гибкость инструмента и увеличивает потери на трении.

В нерабочем положении инденторы удерживаются в



Технология машиностроения

корпусе инструмента специальными сухарями. При создании натяга перед обработкой автоматически происходит расфиксация пучка инденторов. При обработке не допускается прерывание контакта пучка инденторов с обрабатываемой поверхностью во избежание выпадания инденторов из корпуса.

Форма поперечного сечения индентора вносит ограничения в размер шаров: диаметр шара не должен превышать минимальный габаритный размер сечения стержня, что является необходимым условием равномерности передачи импульса всем инденторам пучка. Минимальный размер шара ограничивается максимально возможной величиной зазора между инденторами. Это условие обеспечивает невозможность высыпания шаров волновода через зазоры или заклинивания инденторов в процессе обработки. Длина механического волновода (среднее число слоев шаров), обеспечивающего гибкость инструмента, определяется геометрическими характеристиками обрабатываемой детали. Минимальная длина волновода ограничивается максимальным перепадом размеров обрабатываемой поверхности на большем габаритном размере плюс 1-2 слоя шаров. В противном случае не будет обеспечиваться равномерность обработки. При большой длине механического волновода возрастают потери энергии ударного импульса за счет деформаций и трения в контакте шаров волновода. Этот элемент конструкции является наиболее энергоемким.



1. Подураев В.Н. Технология физико–химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985.– 264 с.
2. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклёпом. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, 1985. – 512 с.
4. Попов М.Е. Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки. РИСХМ. – Ростов н/Д, 1987. – 91 с.
5. Попов М.Е., Лебедев В.А. Обработка деталей методами поверхностного пластического деформирования. РИСХМ. – Ростов н/Д, 1986. – 45 с.
6. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
7. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
8. Бойцов Б.В. Надёжность шасси самолёта. М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
9. Энциклопедический справочник. Инженерные расчёты в машиностроении. Под ред. Саверина М.А. М.: Изд–во машиностроительной литературы. 1947. Т.1, кн.2. – 456 с.
10. Зенкевич О.П. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 281 с.
11. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент.: Изд–во «ФАН», 1979. – 168 с.
12. Павлов В.А. Физические основы пластической деформации металлов. Москва.: Изд–во академии наук СССР, 1962. – 198 с.
13. Дьяченко Е.А. Моделирование процесса высокоамплитудного виброударного упрочнения. //Е.А. Дьяченко, В.А. Лебедев, С.Н. Шевцов//Вестн. Дон. гос. ун–та. – 2004. – Т.4, №3 (21) с. 322 – 331.
14. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977.-232с.