

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЦЕХАНОВ Юрий Александрович
(гражданин России)

УДК 621.787.4

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ПРОТЯГИВАНИЯ
КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ
И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТА
С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев 1993

718 2 7130

Работа выполнена в Воронежском политехническом институте
и в ордена Трудового Красного знамени
Институте сверхтвердых материалов Академии наук Украины

Научные консультанты:

- доктор технических наук, профессор
Дель Г.Д. ;
- академик инженерной АН Украины,
заслуженный деятель науки и техники
Украины, доктор технических наук,
профессор Розенберг О.А.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор
Гавриш А.П. ;
- доктор технических наук, профессор
Смелянский В.М. ;
- доктор технических наук, профессор
Огородников В.А.

Ведущая организация - Экспериментальный научно-исследовательский институт кузнечно-прессового машиностроения, г. Воронеж

Защита состоится "20" сентября 1993г., в 15⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета Д 068.14.10 при Киевском политехническом институте по адресу:
252056, г.Киев, пр-т Победы, 37, КПИ, корп. 1, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского политехнического института

Автореферат разослан "8" июля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор

Н.С. РАВСКАЯ

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802904 (N)

АННОТАЦИЯ

Целью данной диссертационной работы является решение проблемы повышения технологической надежности и качества обработки при деформирующем протягивании, заключающееся в разработке научных методов оценки пластичности и упрочняемости обрабатываемых деталей и повышении работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями на основе исследования технологических закономерностей механики деформируемых заготовок и контактных явлений.

Для решения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследований: изучить влияние технологических факторов процесса на механику деформирования заготовок; разработать методы расчета ресурса использованной и остаточной пластичности заготовок; исследовать упрочнение материала заготовок с учетом явления деформационной анизотропии; разработать методы определения деформирующих усилий при обработке толстостенных заготовок; исследовать закономерности распределения контактных напряжений на рабочей поверхности инструмента; разработать метод расчета рабочих напряжений в износостойких покрытиях нанесенных на деформирующий инструмент; исследовать напряженное состояние стального инструмента с износостойкими покрытиями, закономерности его износа и разработать рекомендации по повышению его стойкости; осуществить промышленную реализацию результатов работы.

Автор защищает следующие основные положения и результаты: методики определения скоростей пластического течения материала заготовок, адгезионной прочности и стойкостных параметров износостойких покрытий; модель напряженно-деформированного состояния в контактной зоне заготовок с бесконечной толщиной стенки; установленные закономерности, связанные с влиянием технологических параметров процесса на механику деформирования заготовок и на распределение контактных нагрузок по поверхности инструмента; метод расчета параметров пластичности заготовок; экспериментально установленные закономерности технологической наследственности деталей по параметрам деформационной анизотропии; модель сил протягивания толстостенных заготовок; метод расчета рабочих напряжений в износостойких покрытиях и закономерности износа инструмента с этими покрытиями; результаты исследований по созданию стального инструмента с покрытиями и его эксплуатационных свойств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы . Одними из основных задач современного машиностроения являются разработка и широкое внедрение ресурсосберегающих технологий и повышение качества продукции, в том числе, за счет применения прогрессивных методов упрочнения деталей машин. Деформирующее протягивание ДПР сочетает в себе процессы формообразования и деформационного упрочнения и применяется как для черновых, так и для чистовых операций.

В настоящее время созданы научные основы процесса ДПР как процесса холодного ступенчатого пластического деформирования. Экспериментально изучены вопросы о влиянии технологических факторов на такие показатели качества изделий, как шероховатость, распределение твердости и остаточных напряжений по толщине стенки заготовки и др. Однако при проектировании операции ДПР для предотвращения технологических отказов, обусловленных разрушением заготовки или инструмента, необходимо уметь правильно назначать режимы обработки, что требует более глубокого изучения механики пластического деформирования детали. Необходимость применения в некоторых случаях больших степеней раздачи, а также обработки заготовок из малопластичных материалов требуют исследования такого параметра качества, как пластичность. К такой задаче, результатом решения которой является ответ на вопрос — разрушится или нет обрабатываемая заготовка, примыкают еще две практически важные задачи. Оценка запаса пластичности нужна, когда после ДПР следует термообработка, поскольку свойства материала после термической операции находятся в большой зависимости от степени использования запаса пластичности. Вторая задача возникает, когда за ДПР следует другая операция, связанная с пластическим деформированием, и для ее реализации необходимо знать технологическую наследственность по параметрам деформируемости.

Неизученной является и деформационная анизотропия деталей, обработанных ДПР, проявляющаяся в том, что пределы текучести их материала в различных направлениях заготовки могут быть различными. Этот параметр качества необходимо учитывать, когда тре-

буется оптимально сочетать технологическую наследственность детали с условиями ее нагружения при эксплуатации с целью обеспечения максимального запаса прочности.

Для решения задач технологического обеспечения качества изделий, полученных ДПР, по параметрам пластичности и деформационной анизотропии необходимо знать влияние технологических параметров на историю деформирования материала обрабатываемых заготовок.

Несмотря на высокую эффективность использования твердосплавных деформирующих элементов протяжек, их применение иногда (когда они имеют фасонный профиль или диаметр более 150 мм) связано с технологическими трудностями спекания заготовок инструмента и их механической обработки. Решить эту проблему можно применением инструмента из закаленных сталей с износостойкими покрытиями. Однако изучению стойкости покрытий, работающих в условиях ДПР при циклически изменяющихся высоких контактных давлениях, посвящено мало исследований. В них не решены задачи оптимизации свойств покрытий, что необходимо для достижения их максимальной стойкости. Имеющиеся сведения говорят о том, что процесс износа покрытий в различных местах контактной поверхности деформирующего элемента имеет различный характер, что может быть обусловлено характером распределения контактных нагрузок и напряженным состоянием самого покрытия. Для изучения этих закономерностей необходимо знать напряженное состояние заготовок в контактной зоне.

Таким образом, изучение технологических закономерностей механики заготовок, обрабатываемых деформирующим протягиванием, и создание на этой основе методов прогнозирования и технологического обеспечения качества изделий и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями является актуальной научной проблемой.

Целью работы является решение проблемы повышения технологической надежности и качества обработки при деформирующем протягивании, заключающейся в разработке научных методов оценки пластичности и упрочняемости обрабатываемых деталей и повышении

работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями на основе исследования технологических закономерностей механики деформируемых заготовок и контактных явлений.

Научная новизна работы. Раскрыты основные закономерности, отражающие влияние технологических параметров деформирующего протягивания на механику деформируемых заготовок и характер их контактного взаимодействия с инструментом:

- получено теоретическое решение для расчета скоростей установившегося пластического течения по известной геометрии линий тока, позволяющее определять кинематику процесса при малых искривлениях этих линий тока;

- для заготовок с бесконечной толщиной стенки на основе теории пластичности неоднородного тела разработана теоретическая модель для расчета параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в контактной зоне при многоцикловом деформирующем протягивании;

- установлены закономерности НДС и истории деформирования материала заготовок и влияние на них технологических параметров процесса ДПР;

- на основе исследований механики процесса изучен характер накопления повреждений в материале деформируемых заготовок;

- с помощью тензорного описания накопления повреждений разработана теоретическая модель для определения параметров ресурса использованной пластичности и остаточной пластичности заготовок, учитывающая анизотропию данных параметров качества изделий;

- установлены основные закономерности деформационной анизотропии деталей, обработанных с помощью деформирующего протягивания;

- установлены закономерности распределения контактных напряжений по рабочей поверхности инструмента и влияние на них технологических параметров процесса ДПР.

Раскрыты основные закономерности, отражающие влияние характера распределения контактных нагрузок на износ деформирующего инструмента с износостойкими покрытиями;

- разработан метод расчета рабочих напряжений в износостойких покрытиях, нанесенных на деформирующий инструмент и

имеющих упругие свойства, отличные от свойств инструментальной основы ;

- на основе анализа НДС покрытий и закономерностей их износа установлено, что доминирующий износ в начале ширины контакта обусловлен малоцикловою усталостью материала покрытий из-за неблагоприятной схемы НДС в этой зоне инструмента.

Практическая ценность и реализация результатов работ.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие практически важные результаты.

Разработаны инженерные методики проектирования технологических операций ДПР, обеспечивающие требуемое качество изделий по параметрам пластичности.

Установленные закономерности деформационной анизотропии позволяют оптимальным образом сочетать технологическую наследственность деталей, полученных с помощью ДПР, с условиями их нагружения при эксплуатации с целью достижения максимального запаса прочности.

Разработан инженерный метод расчета сил ДПР заготовок с бесконечной толщиной стенки.

Разработанная методика моделирования условий работы деформирующих протяжек позволяет оптимизировать свойства и технологические режимы нанесения на инструмент износостойких покрытий для достижения его максимальной стойкости.

Разработаны способы повышения работоспособности стальных деформирующих элементов с износостойкими покрытиями. Созданы и рекомендованы к практическому использованию деформирующие прошивки с детонационными, КИБ - и ЭИД - покрытиями. Изучены технологические свойства этих покрытий и установлены рациональные области их применения.

Результаты работы легли в основу разработки эффективных технологических процессов с применением ДПР и внедрены на Бердянском заводе "Кридромат" и на Червоноармейском РТП с общим экономическим эффектом 165 тыс. руб. в ценах 1988 г.

Апробация работы. Диссертация и отдельные ее разделы были доложены на конференциях и семинарах в г.г. Воронеже, Москве, Кивее, Каневе, Брянске, Самаре, Тольятти, Барнауле, Туле, Делшпиге, и в др. городах. Всего было сделано 15 докладов, в том числе 8

на всесоюзных, 2 на республиканских и 5 на региональных конференциях. По теме диссертации опубликована 51 работа, в том числе 4 авторских свидетельства, а также получено 4 положительных решения на выдачу авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми разделов и общих выводов. Содержание работы изложено на 285 страницах машинописного текста, работа содержит 220 рисунков, 16 таблиц и приложение. Список литературы включает 184 источника. Схема работы представлена на рис.1.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы по изучению механики процесса ДПР. Показано, что это необходимо как для оценки параметров качества изделия и их технологического обеспечения, так и для повышения работоспособности деформирующего инструмента с износостойкими покрытиями. Сформулирована научная новизна и практическая ценность работы.

В первом разделе рассматривается современное представление о механике ДПР и состоянии исследований работоспособности деформирующих элементов, упрочненных износостойкими покрытиями.

На основе анализа работ Л.В.Альшевского, Ю.А.Алхшина, Г.Я.Луна, А.А.Ильюшина, И.И.Казакевича, В.Л.Колмогорова, А.М.Кузнецова, Г.Д.Деся, Н.Ф.Лебедева, Н.Н.Малинина, В.П.Монченко, И.Л.Перлина, Е.А.Попова, Ю.Г.Проскурякова, В.Н.Романова, А.М.Розенберга, О.А.Розенберга, В.И.Стрижака, Г.И.Шельвинского, М.И.Чепурко и др. исследователей установлено, что все эти работы можно разделить на три группы.

Первую группу составляют работы, в которых рассматривается ДПР так называемых заготовок с бесконечной толщиной стенки - с отношением их наружного диаметра к внутреннему $D_0/d \gg 3$. Их обработка ведется с малыми натягами. Для данного типа заготовок часто используется расчетная схема автофретирования, основанная на предположении, что ДПР подобно равномерной раздаче трубы внутренним давлением. Однако экспериментальные данные о величине контактного давления противоречат этой расчетной схеме. Экспериментально-расчетное исследование НДС заготовок, выполненное методом делительных сеток, показывает, что напряженное состояние в контактной области близко к объемному сжатию и отличается от

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ПРОТЯГИВАНИЯ КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

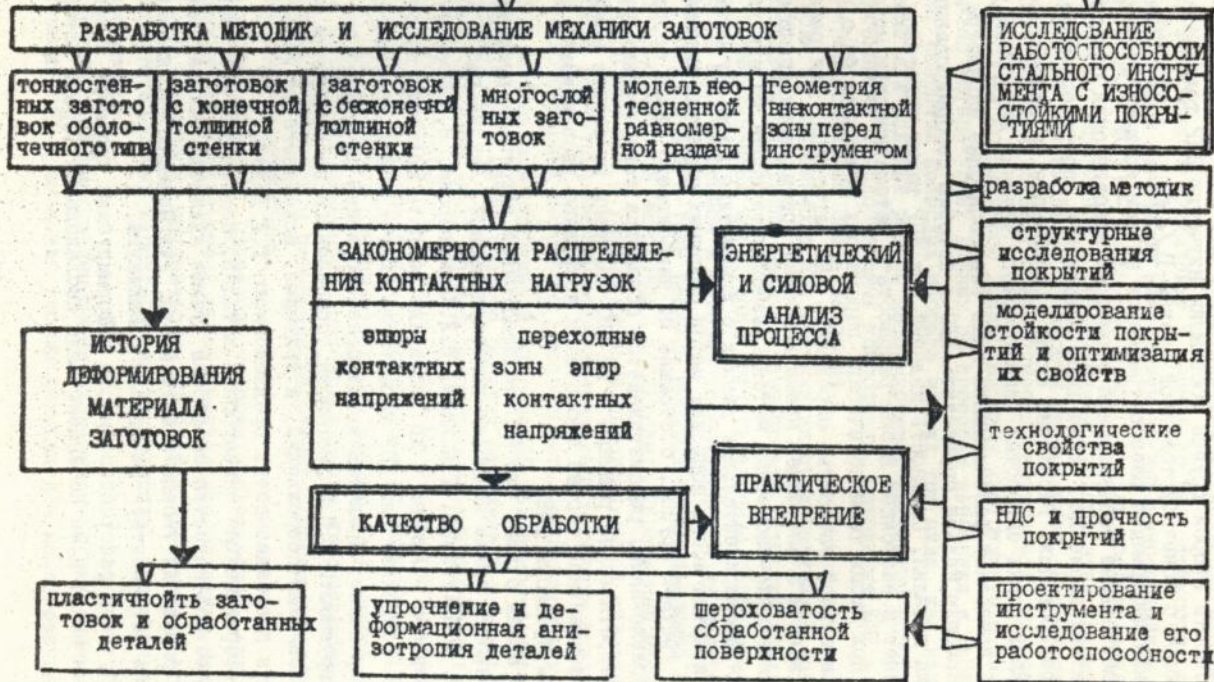


Рис. 1. Схема работы

схемы автофретирования.

Работы второй группы посвящены изучению ДПР толстостенных заготовок с конечной толщиной стенки $\sigma_0/d_0 < 3$, у которых пластическая деформация распространяется на всю толщину стенки. Экспериментальные исследования геометрии пластической области и контактных давлений также дают результаты, противоречащие схеме автофретирования. Расчетные схемы, основанные на кинематически возможных полях скоростей пластического течения материала заготовки, позволяют рассчитывать лишь энергосиловые параметры ДПР. С их помощью нельзя определить НДС и историю деформирования материала изделия. Сложность явлений при ДПР таких заготовок не позволяет в настоящее время разработать математическую модель, которая при любых технологических параметрах позволила бы с удовлетворительной точностью определять НДС заготовок. Для решения такой задачи в настоящее время наиболее приемлемыми являются экспериментально-расчетные методы вязкопластичности. Из них для получения экспериментальных данных о кинематике пообъему заготовки лучше всего подходит метод сплошных слоистых моделей.

В третьей группе, состоящей из наибольшего числа теоретических исследований, рассматривается обработка тонкостенных заготовок. Теоретические решения о их НДС получены на основе моментной или безмоментной теорий оболочек и позволяют рассчитывать все параметры процесса ДПР.

В связи с тем, что НДС толстостенных заготовок неизучено, их пластичность также является неисследованной. Анализ работ А.А. Богатова, С.И. Губкина, Г.Д. Деля, В.Л. Колмогорова, В.А. Огородникова, Г.А. Смирнова - Аляева и др. позволил выбрать критерии деформируемости. Поскольку для ДПР характерно многократное пластическое деформирование, представляется целесообразным сочетание критерия деформируемости В.Л. Колмогорова, основанного на скалярном описании накопления повреждений, и критерия, исходящего из тензорного описания повреждаемости, предложенного Г.Д. Делем.

Деформационная анизотропия деталей, полученных ДПР как один из параметров качества обработки также является малоизученной. Анализ различных теорий пластичности, учитывающих это явление, позволил остановиться на модели Г. Баххауза.

Изучению работоспособности деформирующих протяжек с износостойкими покрытиями посвящено мало исследований, среди которых

следует отметить работы А.М.Кузнецова и Ж.К.Джунусбекова. В них показана возможность увеличения в несколько раз стойкости стальных деформирующих элементов нанесением на них износостойких КИБ (TiN)- и ЭИЛ (VK20) - покрытий. Однако в этих исследованиях не решены вопросы, связанные с оптимизацией свойств этих покрытий для достижения максимальной стойкости инструмента. Имеющиеся в них данные свидетельствуют о зависимости характера их износа от закономерностей контактного взаимодействия инструмента с заготовкой. Анализ литературных данных по способам нанесения и свойствам различных покрытий позволил выбрать из них три вида как наиболее подходящие для условий работы деформирующих элементов протяжек: детонационные из твердосплавных композиций, нитридные КИБ - покрытия и твердосплавные ЭИЛ - покрытия.

Исходя из изложенного, для достижения цели настоящей работы были поставлены следующие задачи: разработать методики исследования НДС обрабатываемых заготовок; изучить влияние технологических факторов на НДС заготовок и историю деформирования их материала при ДПР; разработать методы расчета ресурса использованной и остаточной пластичности заготовок; исследовать упрочнение материала заготовок при ДПР с учетом явления деформационной анизотропии; разработать расчетные методы определения деформирующих усилий при ДПР толстостенных заготовок; исследовать закономерности распределения контактных напряжений на рабочей поверхности инструмента; разработать метод расчета рабочих напряжений в износостойких покрытиях, нанесенных на деформирующие элементы; исследовать НДС стального инструмента с износостойкими покрытиями, закономерности его износа и разработать рекомендации по повышению его стойкости; осуществить промышленную реализацию результатов работы путем разработки инженерных методов расчета пластичности обрабатываемых заготовок и повышения работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями.

Во втором разделе приведены условия исследований, инструмент, аппаратура, расчетные и экспериментальные методики исследования НДС заготовок, механических свойств износостойких покрытий и эксплуатационных характеристик инструмента, упрочненного этими покрытиями.

Теоретический анализ имеющихся экспериментальных данных показал возможность применения теории подобия для исследования ме-

ханики ДПР. Поэтому эксперименты проводились, в основном, на заготовках с постоянным внутренним диаметром, равным 20 или 35 мм, что позволило существенно уменьшить объем опытов. Предложены критерии подобия для изучения различных явлений ДПР.

Исследования проводились на заготовках из конструкционных сталей 10, 20, 20Х, 40Х, 45, углеродистых сталей У8, У12, легированных сталей 40ХНМА, 30ХГСА, нержавеющей стали Х18Н10Т, цветных металлов и сплавов: меди М1, Л63, БрОЦС, МЛ5пч, АК6, В95. В качестве материала деформирующих элементов протяжек применялся твердый сплав ВК15, а также инструментальные стали Р6М5, Х12Ф1, Х12М, ШХ15, ХВГ, У8, 40Х, 35ХГСА, закаленные до твердости 63 - 64 НРС₀, которые упрочнялись износостойкими покрытиями: детонационными из ВК15В, ЭИЛ - покрытиями из ВК20 и КИБ - покрытиями из TiN, CrN и композиции TiN + ZrN. Эти покрытия наносились, соответственно, на установках "Перун", "УИЛ-1" и "Булат". Были изготовлены комплекты деформирующих элементов диаметром 19 - 39 мм с шагом 0,1 мм. Использовались технологические смазки: сульфозфрезол, 10%-й водный р-р мыла, индустриальное масло АМГ-10, твердая смазка на основе дисульфида молибдена. Эксперименты проводились на специальном стенде с применением деформирующих прошивок и на универсальных гидравлических прессах.

Распределение интенсивности напряжений σ_0 по объему упрочненного материала заготовок определяли экспериментально методом измерения твердости или рассчитывали с помощью кривой упрочнения. В контактной зоне НДС заготовок с бесконечной толщиной стенки определяли расшифровкой экспериментальных данных по распределению σ_0 с помощью численного построения сетки линий скольжения.

Кинематические параметры в установившейся стадии ДПР заготовок с конечной толщиной стенки определяли по линиям тока с помощью оригинальной методики, позволяющей с достаточной точностью рассчитывать скорости течения даже при малых искривлениях этих линий тока, что обусловлено малыми углами рабочего конуса деформирующего элемента. Получены формулы для расчета скорости течения:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha} \exp \left(\int_{s_0}^s \frac{1}{\sin \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial z} ds \right); \quad \frac{V}{V_0} = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \left(\exp \left(\int_{s_0}^s \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial z} ds \right) \right)^{-1},$$

где V - скорость, S - длина линии тока, α - угол наклона линии

тока к радиальной координате r , z — осевая координата. Картины линий тока получали выявлением волокнистой макроструктуры заготовки и с помощью слоистых моделей. Слоистый материал изготавливали диффузионной сваркой пакета пластин из стали 08КП толщиной 0,35 мм, покрытых слоем никеля толщиной 2 мкм.

Напряжения рассчитывали по соотношениям теории течения интегрированием дифференциального уравнения равновесия вдоль радиальной координаты от наружной поверхности заготовки к внутренней. При выходе на контактную поверхность вычисляли контактные давления.

Так как разрушение заготовок с толстостенностью $\bar{D}_0 = \frac{D_0}{d_0} < 2$ начинается у наружной поверхности, то здесь НДС дополнительно определяли методом делительных сеток. Для этого на наружную поверхность исходной заготовки вдоль образующей наносили метки с помощью алмазного индентора головки прибора ТПП-2, установленной на микроскопе БИМ-1. Базовое расстояние между метками для повышения точности методики измеряли и до деформирования заготовки.

Разработана и использована экспериментально-расчетная методика определения НДС заготовок оболочечного типа, основанная на полученном экспериментально распределении σ_0 в их срединной поверхности.

Эксплуатационные характеристики деформирующих элементов с износостойкими покрытиями определяли как с помощью известных, так и специально разработанных методик. К первым относятся методики определения деформирующих сил, ширины контакта, коэффициента трения, стойкости против схватывания. В основу последней положена схема взаимодействия цилиндра из обрабатываемого материала, вращающегося в центрах токарного станка, и стержня со сферическим торцом из инструментального материала, связанного с динамометром. Склонность к схватыванию оценивали по величине контактного давления, при котором это схватывание наступало.

Для определения параметров стойкости покрытий разработана оригинальная методика моделирования условий работы инструмента при ДПР, защищенная авторскими свидетельствами, которая, как показал анализ выявленных закономерностей контактного взаимодействия, соответствует наиболее тяжелым условиям работы инстру-

мента - обработке заготовок с бесконечной толщиной стенки. Она заключается в том, что из обрабатываемого материала изготавливается цилиндрическая заготовка, на наружной поверхности которой нарезается трапецеидальная резьба. Образец из инструментального материала с нанесенным износостойким покрытием прижимается с заданной силой к винтовой поверхности вращающейся заготовки и перемещается вдоль нее с подачей, равной шагу резьбы. Рабочий контактный торец образца выполнен в соответствии с геометрическими параметрами реального инструмента. Для моделирования циклического характера нагружения покрытия на всю длину заготовки нарезаются продольные пазы, равномерно распределенные по окружности. Меняя число пазов, можно варьировать соотношением между числом циклов нагружения N и суммарным путем трения $L : L' = L / N$, которому в реальных условиях ДПР соответствует длина обрабатываемого отверстия. Меняя угол профиля резьбы, можно менять величину контактного давления. Таким образом, разработанная методика позволяет варьировать основными технологическими факторами ДПР. Данная методика при измерении составляющих сил P_z и P_y позволяет также определять коэффициент трения.

Для определения механических характеристик покрытий, отсутствующих в литературных источниках, разработан ряд методик. Упругие и прочностные параметры определялись испытанием на изгиб консольной балочки из материала инструментальной основы с нанесенным на нее покрытием. Для определения адгезионной прочности разработан способ, защищенный авторскими свидетельствами, основанный на явлении отслоения покрытия под действием отрывающих напряжений, возникающих между покрытием и основой на выпуклой криволинейной поверхности сжимаемого образца.

Остаточные напряжения в покрытиях определяли как с помощью метода Давиденкова, так и расшифровкой экспериментальных данных по коробочку круглой пластины с нанесенным на нее покрытием.

Исследования структуры и состава покрытий производились с помощью методов оптической металлографии, электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. При этом использовались оборудование: микроскоп "Neophot-21", установки "Cam-Scan" и "Микроскан - 5".

Третий раздел посвящен механике ДПР однослойных заготовок и влиянию на нее различных технологических параметров.

Для заготовок с бесконечной толщиной стенки показано, что деформированное состояние в контактной зоне можно считать плоским. Исследования проводили на заготовках, протягиваемых сферическим и коническими деформирующими элементами с углами рабочего конуса $\gamma = 5^\circ$ и 10° с различными натягами α . В результате расшифровки экспериментальных данных по распределению σ_0 построены сетки линий скольжения и определено напряженное состояние в пластической области. Установлено, что оно носит сложный характер, не соответствующий схеме автофретирования. Материал заготовки находится в условиях сильного объемного сжатия. Изменение α практически не влияет на НДС заготовки. Контактные давления монотонно уменьшаются от начала к концу ширины контакта, а с увеличением угла инструмента γ неравномерность их распределения увеличивается. У поверхности заготовки на выходе из контакта осевые напряжения становятся растягивающими.

Методом твердости установлено, что при многоцикловом ДПР заготовок с бесконечной толщиной стенки уже при прохождении третьего деформирующего элемента градиент интенсивности напряжений σ_0 упрочненного поверхностного слоя в зоне контакта практически перпендикулярен к обрабатываемой поверхности и его можно считать постоянным по глубине. Для такого закона изменения пластической постоянной $k = \sigma_0 / \sqrt{z}$ решением методом характеристик уравнений неоднородного пластического тела получены аналитические зависимости для определения напряжений в контактной зоне заготовки. Анализ полученного решения показал, что градиент упрочнения вызывает вдоль линий скольжения дополнительное изменение гидростатического давления σ , что приводит к его линейному уменьшению от начала к концу контакта; аналогично меняется и нормальное контактное напряжение σ_n . С ростом градиента упрочнения неравномерность такого распределения увеличивается, а осевые напряжения σ_x в конце контакта становятся растягивающими. На рис. 2 представлены некоторые результаты полученного решения - распределение в контактной зоне напряжений σ_x , σ (для сравнения рассмотрен случай неупрочняющегося материала), а также эпюра σ_n . Для σ_n получено уравнение - $\sigma_n = k(2 + \gamma) + 4\sqrt{z} \Delta k \cdot X_k / \rho_k$

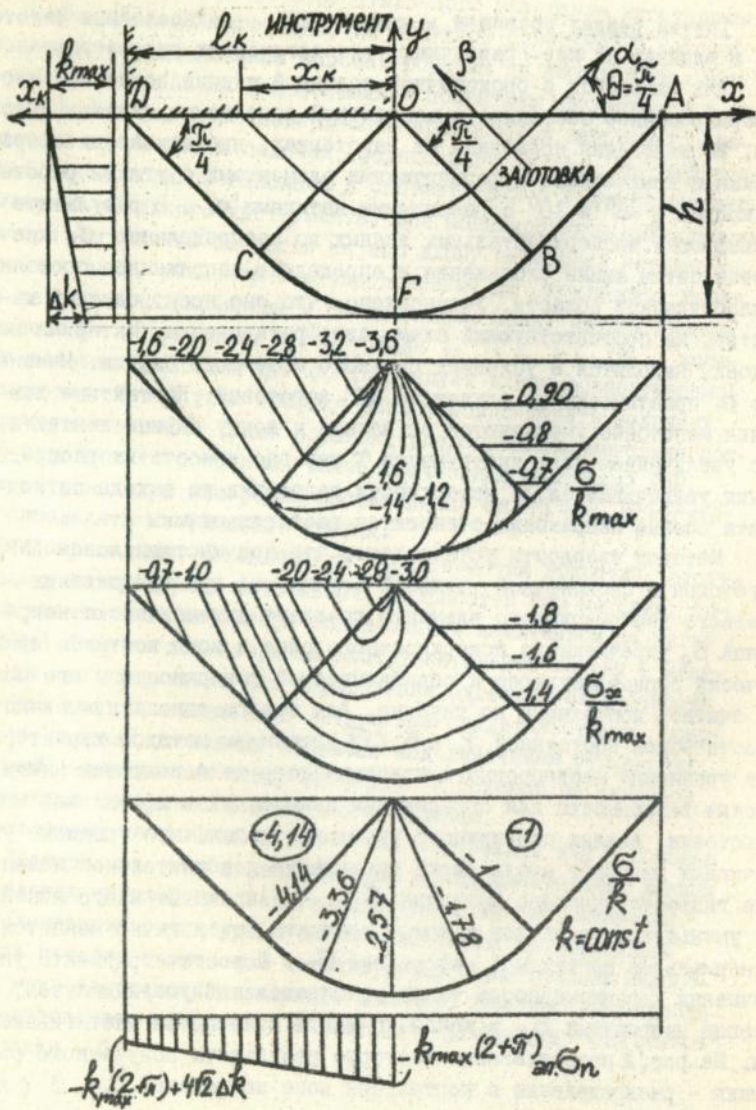


Рис. 2. Напряженное состояние в контактной зоне

которое показывает, что максимума контактное давление достигает в самом начале контакта.

Методом делительных сеток установлено, что деформированное состояние в контактной зоне может быть представлено в виде суммы локального деформированного состояния и деформированного состояния равномерно раздаваемой трубы. Локальное зависит только от геометрии рабочей части инструмента. Это позволяет рассчитывать по известной кривой упрочнения $\sigma_0 = \sigma_T + A \bar{\epsilon}_0^n$ градиент $\Delta k/k_{max}$ $= (\Delta \bar{\epsilon}_{\sigma_{max}}^n + \Delta \bar{\epsilon}_y^n) / [\sigma_T / (AN)^n + \Delta \bar{\epsilon}_{\sigma_{max}}^n]$, где N - число циклов деформирования, $\Delta \bar{\epsilon}_{\sigma_{max}}$ - накопленная локальная деформация на поверхности заготовки, $\Delta \bar{\epsilon}_y \approx a/d_0$ - деформация равномерно раздаваемой трубы. Величина $\Delta \bar{\epsilon}_{\sigma_{max}}$ определялась экспериментально методом визио-пластичности; для $\gamma = 5^\circ$ $\Delta \bar{\epsilon}_{\sigma_{max}} \approx 0,17$. Таким образом получена замкнутая теоретическая модель, позволяющая рассчитывать все параметры НДС заготовок с бесконечной толщиной стенки при многоцикловом ДПР.

Влияние различных технологических параметров на НДС заготовок с конечной толщиной стенки изучалось выявлением волокнистой макроструктуры и с помощью слоистых моделей. В обоих случаях кинематика процесса ДПР была одинаковой, что позволило основные исследования выполнить более точным способом - на слоистых моделях, которые обрабатывались по трем схемам: с осевым сжатием, с осевым растяжением и с осевым заневоливанием. Толстостенность заготовок $\bar{D}_0 = D_0/d_0$ составляла 0,028 - 2,0; относительный натяг $\bar{\delta} = a/d_0 = 0,1 - 0,26$, а угол инструмента $\gamma = 5^\circ - 30^\circ$. Распределение σ_0 получали по кривой течения.

Установлено, что деформированное состояние не зависит от материала заготовки, а схема обработки влияет, в основном, только на скорости осевых деформаций. Характер изменения накопленной деформации $\bar{\epsilon}_0$ определяется только величинами $\bar{\delta}$ и \bar{D}_0 и мало зависит от других технологических параметров.

Напряженное состояние у контактной поверхности соответствует объемному сжатию, а на наружной поверхности в области контакта - равномерному двухосному растяжению и приближается к схеме автофретирования; здесь НДС практически не зависит от схемы обработки и угла γ . Контактные давления имеют максимум в точке, которая с уменьшением толщины стенки перемещается от начала к

концу ширины контакта.

Показатель напряженного состояния $\eta = \bar{\sigma} / \bar{\sigma}_0$ меняется от отрицательных значений у контактной поверхности до положительных на наружной. Степень использования запаса пластичности Ψ , определенная по критерию В.Л.Колмогорова, максимальна у наружной поверхности, где и следует ожидать зарождения трещин, что согласуется с наблюдениями.

В связи с этим более тщательно влияние технологических параметров на НДС на наружной поверхности было изучено с помощью делительных сеток. Исследования выполнены на 47 образцах из сталей: ст.3, 10, 40Х, ХВГ, ШХ15 с $\bar{D}_0 = 1,1-2,0$ и $\bar{\delta} = 0,018-0,086$ и $\gamma = 5^\circ$. Подтверждено, что НДС на наружной поверхности не зависит от угла γ и от схемы обработки, а определяется только толстостенностью заготовки и величиной относительного натяга. Характерное распределение окружных и меридиональных напряжений вдоль поверхности заготовки показано на рис.3. История деформирования во всех исследованных случаях носит немонотонный характер. В области контакта реализуется схема двухосного растяжения с $\eta = +2$; здесь и происходит основное накопление деформаций и повреждений. В зонах внеконтактной деформации $\eta < 0$.

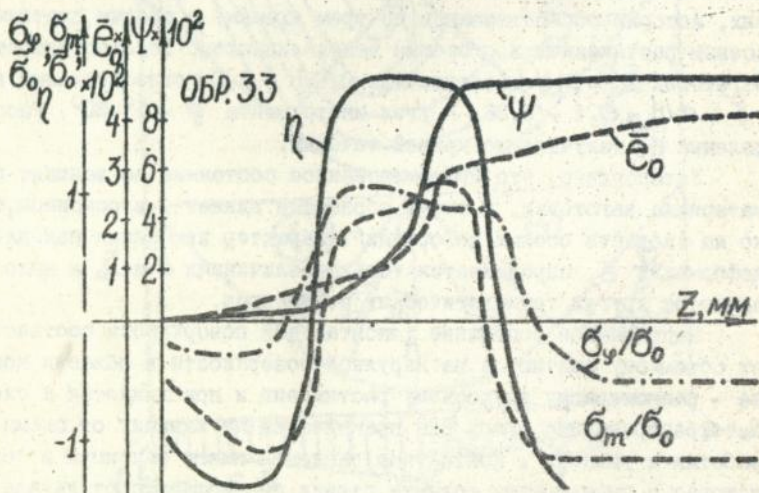


Рис.3. Напряженное состояние на наружной поверхности заготовки

Исследовано НДС тонкостенных заготовок с $\bar{P}_0 = 1,06-1,12$, когда распределение $\bar{\sigma}_0$ в их срединной поверхности получено экспериментально. Установлено, что окружные и меридиональные напряжения по величине монотонно увеличиваются от начала к концу контакта. Изменение условий контактного трения влияет только на величину меридиональных напряжений. Контактные давления пропорциональны толщине стенки заготовки и имеют максимум в конце ширины контакта. Результаты исследования НДС, полученные с помощью измерения твердости, хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов по безмоментной теории оболочек.

Для анализа энергетики ДПР и изменения размеров заготовок разработана теоретическая модель равномерной раздачи труб в условиях нестесненной осевой деформации - $e_z = K \neq 0$. С помощью уравнения кривой течения для заготовки единичной длины получено выражение работы раздачи как части общей работы ДПР:

$$A = 2\pi \int_{z_0}^{z_n} (\sigma_T \bar{e}_0 + \frac{A}{n+1} \bar{e}_0^{-n+1}) z dz; \quad \bar{e}_0 = \frac{\rho}{\sqrt{3}} \sqrt{e_\varphi^2 + K e_\varphi + K^2}.$$

При выполнении условий несжимаемости и совместности деформаций окружная деформация вдоль радиуса меняется по закону:

$$e_\varphi = 0,5 \ln \left\{ \left[1 + \left[\exp(2e_{\varphi 0} + K) - 1 \right] \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right] \right\} - \frac{K}{2}; \quad e_{\varphi 0} = \ln \left(1 + \frac{A}{\sigma_0} \right).$$

Осевая деформация K является варьируемым параметром, соответствующим минимуму A . Задача решается численно. Расчеты по данной модели показали, что изменение размеров заготовки не зависит от их материала, а до $\bar{\sigma} = 0,15$ оно хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при ДПР, что позволяет использовать данную модель в технологических расчетах. Разработан алгоритм использования полученного решения для анализа процесса деформирования многослойных заготовок.

Как показано в разделе 5, на прочность износостойких покрытий, нанесенных на инструмент, существенное влияние оказывает длина переходной зоны l_n в начале ширины контакта. Она в значительной степени зависит от явления предварительного смятия микронеровностей обрабатываемой поверхности на величину ΔR_z за счет того, что внеконтактная деформация перед инструментом обеспечивает плавное сопряжение внутренней поверхности заготовки с инструментом. Форму этой поверхности описывали в виде степенного полинома. Получено выражение для мощности пластического

деформирования в зоне внеконтактной деформации, зависящее от двух варьируемых параметров - скорости осевой деформации K_1 и длины этой зоны l_B . Минимум функционала мощности отыскивался численно. Установлено, что $K_1 \approx -2,2$, а $l_B = 0,61(2t_0/d_0)^{0,54}$. Длина l_n зависит от технологических параметров $l_n = 1 - Z_1 l_B$, где Z_1 находится из уравнения $-\frac{1}{8}Z_1^4 + \frac{3}{4}Z_1^2 - Z_1 + \frac{3}{8} = \Delta R_2 l_B t_0$. Анализ полученного решения показал, что l_n может меняться от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров. С уменьшением γ и с увеличением t_0 , d_0 и шероховатости обрабатываемой поверхности длина переходной зоны увеличивается, что благоприятно сказывается на работоспособности износостойких покрытий.

В четвертом разделе рассмотрены некоторые вопросы механики ДПР многослойных заготовок с числом слоев 2 и 3. Изучены закономерности изменения размеров изделий после ДПР. Установлено, что наружный слой независимо от схемы обработки всегда укорачивается, что хорошо описывается разработанной моделью равномерной раздачи многослойной трубы при нестесненной осевой деформации. Внутренний слой в зависимости от режимов обработки может как укорачиваться так и удлиняться. В отличие от однослойных заготовок изменение его длины зависит от материала изделия, что обусловлено трением между слоями, которые при ДПР проскальзывают друг относительно друга в осевом направлении. Длина многослойных заготовок также оказывает существенное влияние на механику процесса, что тоже связано с явлением трения между слоями.

На наружной поверхности НДС изучалось методом делительных сеток. Установлено, что здесь оно соответствует двухосному растяжению, но с более мягкой, чем у однослойных заготовок, схемой: $\nu = 1,2-1,5$, а следовательно с менее интенсивным накоплением повреждений. С увеличением числа слоев НДС приближается к схеме равномерной раздачи трубы в условиях нестесненной осевой деформации, которую можно использовать для расчета пластичности трехслойных заготовок.

Ширина контакта качественно также зависит от контактного давления, как и при ДПР однослойных заготовок. Ее минимум соответствует критическому для данного обрабатываемого материала контактному давлению. Зависимость коэффициента трения от величины контактного давления получилась такой же как и при ДПР однослойных заготовок.

В пятом разделе излагаются результаты исследований и пути повышения работоспособности стального деформирующего инструмента с износостойкими покрытиями. В основу этих исследований положены выявленные закономерности распределения контактных нагрузок по рабочей поверхности инструмента.

Методом конечных элементов исследовано НДС сплошной деформирующей прошивки. Получена связь между технологическими параметрами ДНР и условием прочности такого инструмента.

Для тонких покрытий с равномерным распределением по их толщине параметров НДС, имеющих другие, чем у основы, упругие характеристики, получено решение, связывающее напряжения в покрытии и на поверхности основы; индексом "о" снабжены величины, относящиеся к основе, а индексом "п" - к покрытию:

$$\sigma_{x\alpha} = \frac{1+\mu_0}{1+\mu_n} \frac{E_n}{E_0} \sigma_{x\alpha 0}; \quad \sigma_{x\beta} = \frac{\mu_n}{1-\mu_n} \sigma_n + \frac{1}{1-\mu_n^2} \frac{E_n}{E_0} [(\mu_n - \mu_0) \sigma_{z0} + (1 - \mu_n \mu_0) \sigma_{x0} + \mu_0 (1 + \mu_n) \sigma_n].$$

Для $\sigma_{z\beta}$ формула получается перестановкой индексов x и z ; x - меридиональная, а z - окружная координаты поверхности инструмента. Анализ полученного решения показал возможность влияния на напряженное состояние тонких покрытий путем оптимального сочетания упругих свойств покрытия и основы. В частности, напряжения в покрытии будут тем меньше, чем меньше отношение модулей упругости E_n / E_0 .

С помощью МКЭ не удалось выявить особенности НДС у самой поверхности инструмента в переходных зонах начала и конца контакта из-за больших градиентов контактных нагрузок на этих участках. Для решения этой задачи было предложено использовать аналитические зависимости, которые получаются из допущения, что НДС в контактной зоне подобно НДС бесконечного упругого пространства. Эпюры контактных давлений предложено аппроксимировать линейно-кусочными функциями. Приемлемость такой расчетной схемы подтверждена сравнением результатов, полученных с ее помощью и методом КЭ.

Структурные исследования КИБ-покрытий показали, что по толщине они являются однородными. Это позволило применить теоретическую модель тонких покрытий для исследования КИБ-покрытий. В качестве инструментальной основы рекомендована сталь Х12Ф1.

На рис. 4 показано распределение σ_x вдоль поверхности реальной деформирующей прошивки, используемой при раздаче шпилек крестовин, полученное с учетом значений E_n и остаточных напряжений по данным А.С.Верещаки и И.Л.Третьякова. В начале контакта (т.В) σ_{x0} становятся растягивающими и они увеличиваются с ростом коэффициента трения и параметра $m = \sigma_D/\sigma_C$, характеризующего градиент ρ_n в переходной зоне. При $f = 0,12$ и $m = 10$, что соответствует реальным условиям эксплуатации инструмента, σ_{x0} достигает величины $0,4 \rho_{ncp}$ и может превысить предел прочности на растяжение материала покрытия. На выходе из контакта (т.Д) покрытие испытывает сильное сжатие. Видно, что σ_{xp} в покрытии на твердосплавной основе в полтора раза меньше, чем в покрытии на стальном инструменте.

Как показано в разделе 3, при среднем контактном давлении q_f превышающим критическое $q_{кр}$ перед инструментом начинает появляться наплыв, что ведет к резкому увеличению m , а значит и σ_{xp} в т.В. Следовательно многоцикловое ДПР заготовок с бесконечной толщиной стенки соответствует наиболее тяжелым условиям работы износостойких покрытий. Для их надежной работы можно рекомендовать режимы обработки, при которых $q_f < q_{кр}$.

Исследования стойкости против схватывания показали, что TiN- и CrN- покрытия при обработке углеродистых сталей и латуни превосходят твердый сплав ВК15, а при обработке нержавеющей стали и меди показывают неудовлетворительную работоспособность.

Стойкостные испытания, проведенные как при моделировании так и в производственных условиях, показали, что максимальной стойкостью обладает покрытие TiN, легированное 7,5% Zn (стойкость по сравнению с TiN-покрытием увеличивается в 6 раз), толщиной 7 - 8 мкм. По сравнению с твердосплавным стальным инструментом с таким покрытием обладает стойкостью в 4 - 5 раз меньшей. Получены стойкостные диаграммы для этого покрытия - рис. 5.

Исследования процесса изнашивания разработанного покрытия на реальном инструменте подтвердили установленные теоретическим путем закономерности его НДС. Доминирующим является износ в начале контакта из-за хрупкого разрушения покрытия в условиях малоциклового усталости от действия растягивающих напряжений. Второй зоной интенсивного износа является криволинейный участок

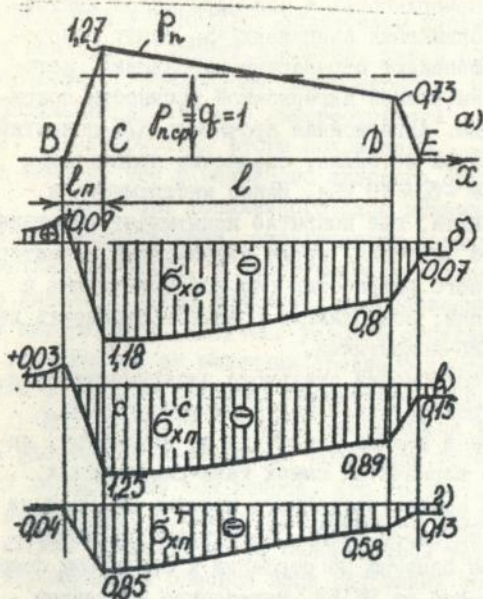


Рис. 4. Напряжения в покрытии:

а-эпюра контактных давлений;

б-эпюра σ_x в основе;

в-эпюра σ_x в покрытии на стальной основе;

г-эпюра σ_x в покрытии на твердом сплаве

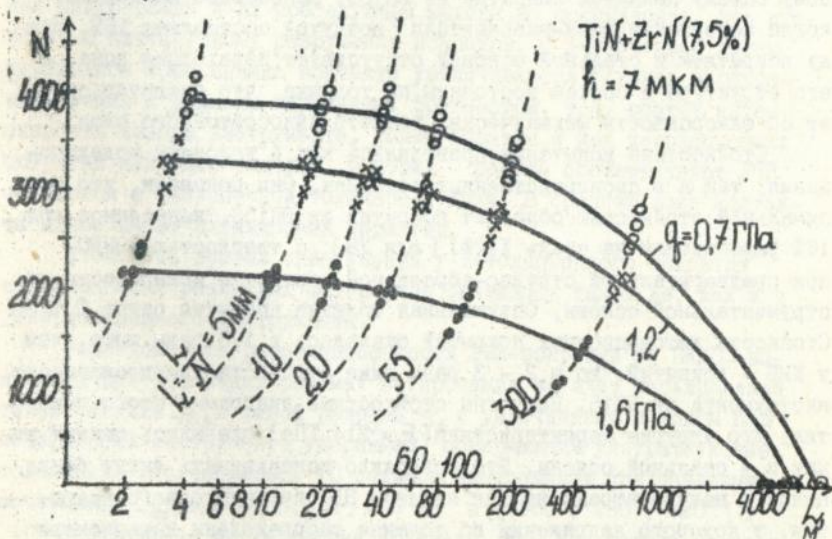


Рис. 5. Диаграмма стойкости КИВ-покрытия при обработке стали 45

между конической рабочей поверхностью и цилиндрической ленточкой. Здесь под действием сжимающих напряжений $\sigma_{\text{хп}}$ между износостойким слоем и основой возникают отрывающие напряжения, которые при достижении величины, равной адгезионной прочности покрытия, вызывают его отслоение. Адгезионная прочность КИБ-покрытий, определенная по разработанной методике, оказалась практически не зависящей от их состава — $\sigma_{\text{а}} \approx 40$ МПа. Износ инструмента в средней части ширины контакта, где покрытие испытывает действие высокого гидростатического давления, носит адгезионный характер.

На основании изложенного разработан ряд конструктивных и технологических рекомендаций, позволяющих повышать стойкость деформирующихся элементов с КИБ-покрытиями.

Исследования работоспособности стального инструмента с детонационными покрытиями проводились с целью оптимизации их свойств — состава, толщины и режима нанесения по параметру, определяющему содержание во взрывчатой смеси газа-разбавителя. Исследовались покрытия из компактированного порошка ВК15В и из механической твердосплавной смеси ВК15. Структурные исследования показали, что наиболее близким по строению к спеченному твердому сплаву является покрытие из ВК15В, нанесенное на режиме, когда содержание газа-разбавителя (воздуха) составляет 16%. Между покрытием и стальной основой отсутствует переходная зона, а его структура и состав постоянны по толщине, что свидетельствует об однородности механических свойств износостойкого слоя.

Стойкостные испытания проводились как в условиях моделирования, так и в производственных условиях. Они показали, что максимальной стойкостью обладает покрытие из ВК15В, нанесенное при 16% разбавителя на сталь Х12Ф1 (или У8) с твердостью 59НRC₀ при предварительной струйно-абразивной обработке поверхности инструментальной основы. Оптимальная толщина покрытия равна 0,1 мм. Стойкость детонационных покрытий оказалась в 1,5 раза выше, чем у КИБ-покрытий, но в 2 — 3 раза ниже стойкости твердосплавного инструмента из ВК15. Получены стойкостные диаграммы этого покрытия. Его упругие характеристики ($E_{\text{н}} = 214$ ГПа) оказались такими же, как и у стальной основы. Это позволило использовать схему бесконечного полупространства для анализа НДС детонационного покрытия, у которого напряжения по толщине распределены неравномерно.

В расчетах учитывались остаточные напряжения, которые возникают как при напылении покрытия, так и при его алмазно-абразивной обработке. Установлены закономерности распределения остаточных напряжений по толщине износостойкого слоя. Определены прочностные характеристики этого покрытия: $\sigma_{\text{вр}} = 500-600$ МПа, что в 3 раза меньше, чем у спеченного твердого сплава; $\sigma_{\text{а}} = 80-100$ МПа.

Анализ НДС напыленного слоя показал, что при любых условиях его эксплуатации, определяющих характер распределения контактных нагрузок, у инструмента наиболее опасными являются зоны начала и конца контакта, расположенные на некоторой глубине от поверхности. Получено условие статической прочности покрытия в зависимости от величины среднего контактного давления, связанного с технологическими параметрами ДПР.

Исследование процесса изнашивания детонационного покрытия на работающем инструменте позволило установить наличие нескольких характерных зон износа, что соответствует особенностям НДС в этих зонах. Доминирующим является хрупкое разрушение покрытия в начале контакта из-за малоциклового усталости. Оно проявляется в зарождении в опасной зоне глубинных усталостных горизонтальных микротрещин и их последующем выходе на поверхность, что приводит к питтинговому разрушению покрытия. С уменьшением длины переходной зоны начала контакта увеличиваются глубина зарождения трещин и размеры вырываемых фрагментов, т.е. растет интенсивность износа инструмента. Таким образом и для детонационных покрытий наиболее тяжелые условия работы соответствуют ДПР загусток с бесконечной толщиной стенки. В средней зоне контакта износ имеет адгезионный характер.

Стойкость против схватывания у детонационного покрытия при обработке различных материалов оказалась такой же, как и у твердосплавного инструмента.

Исследовалась работоспособность ЭИД-покрытий из ВК20, наносимых при различных режимах легирования за счет варьирования током разряда $I_{\text{эф}}$ и фазой разряда φ_1 с упрочнением методом ПЦД поверхности инструмента ударником, совершающим ультразвуковые колебания. Исследовалось 10 режимов легирования при различных сочетаниях $I_{\text{эф}}$ (0,3 А; 0,6 А; 0,8 А) и φ_1 (180°, 250°, 320°).

Структурные исследования показали, что все режимы позволя-

ют получать на поверхности инструмента покрытие, имеющее дискретную структуру в виде отдельных очагов легирования, толщиной 4 - 10 мкм, шероховатостью R_a (0,7 - 0,95 мкм), хорошо соединенное со стальной основой, в качестве которой применялись стали ШХ15, X12M, X12Ф1, P6M5, термообработанные до твердости HRC₉ (60 - 63). ЭИЛ - слой представляет собой однородную смесь компонент стальной основы и электрода (BK20), не содержащую карбиды вольфрама, что определяет его низкую (по сравнению с литецкими и КИБ - покрытиями) микротвердость - 4-6 ГПа. При ЭИЛ закаленных сталей X12Ф1, X12M, P6M5, температура отпуска которых не ниже 500°C, слой вторичного отпуска не образуется, что позволяет рекомендовать их для изготовления инструмента с ЭИЛ - покрытием. Наименьшей дефектностью (отсутствием первичных микротрещин, возникающих из-за термического удара) обладает покрытие, нанесенное в режиме ЭИЛ7 ($I_{эф} = 0,6$ А; $\varphi_1 = 320^\circ$). Наибольшее количество таких дефектов имеет покрытие ЭИЛ10 ($I_{эф} = 0,8$ А; $\varphi_1 = 320^\circ$).

Стойкостные испытания покрытий, нанесенных на различных режимах, выполненные в производственных условиях, дали результаты, качественно соответствующие результатам ранжирования этих покрытий по стойкости, полученным в условиях моделирования. При обработке заготовок из сталей наибольшую стойкость показало покрытие ЭИЛ7. Для него получены стойкостные диаграммы.

Исследования стойкости против схватывания проводились для покрытий ЭИЛ7 и ЭИЛ4 ($I_{эф} = 0,8$ А; $\varphi_1 = 180^\circ$; без ШПД), что позволило определить возможности их использования при обработке сталей и цветных металлов. Покрытие ЭИЛ7 нельзя использовать для обработки заготовок из цветных металлов и сплавов.

Анализ условий нагружения ЭИЛ-покрытий показывает, что их дискретное строение должно предотвращать возникновение больших растягивающих напряжений, а следовательно и их хрупкое разрушение. Эксперименты подтвердили это предположение. Установлено, что причиной износа ЭИЛ - покрытий по всей контактной поверхности является не малоцикловая усталость (как у сплошных покрытий), а адгезионное истирание.

Область применения ЭИЛ - покрытий из BK20 ограничена твердостью обрабатываемого материала и величиной контактных давле-

ний в 4 ГПа. Несмотря на значительно меньшую стойкость, чем у детонационных покрытий и у КИБ - покрытий (в 5 - 8 раз), ЭИИ - покрытия с учетом дешевизны и простоты их получения в производственных условиях и возможности многократного нанесения на один и тот же инструмент могут быть рекомендованы к практическому применению.

Шестой раздел посвящен силовому и энергетическому анализу процесса ДПР. Для заготовок с $\bar{D}_0 \gg 3$ получены нижняя (методом линий скольжения) и верхняя (с помощью разрывного поля скоростей) оценки деформирующей силы. Эксперименты показали, что при многоцикловогой обработке таких заготовок усадка отверстия (уменьшение его диаметра по сравнению с диаметром инструмента) линейно зависит от суммарного натяга: $\Delta = m \sum a_i$. Значения m экспериментально определены для различных материалов. Получена формула для суммарной силы на N деформирующих элементах при постоянном a_i : $Q_N = \pi d_0 \sigma_0 a_i N [1 + m(N-1)/2] / (2\sqrt{3})\Psi$. За величину безразмерной силы Ψ принимается среднее из ее значений, полученных методами нижней и верхней оценок. Эксперименты показали, что за среднее значение σ_0 в поверхностном слое заготовки можно принять σ_0 в шейке разрушенного растяжением образца из обрабатываемого материала или σ_0 в образце разрушенном сжатием (если материал малоэластичный). Отличие сил, полученных экспериментально и рассчитанных по разработанной модели, не превышает 20%.

Силы трения оказывают значительное влияние на энергетику процесса ДПР. Поэтому для расчетов технологических усилий необходимо знать фрикционные свойства разработанных износостойких покрытий, которые в значительной степени определяются зависимостью коэффициента трения от контактного давления и шероховатости обрабатываемой заготовки.

Теоретически показано, что погрешность определения коэффициента трения из опытов по ДПР, которая обусловлена неравномерностью распределения контактных давлений по поверхности инструмента, не превышает 6%. Это позволяет использовать полученную зависимость $f = f(q_c)$ для анализа закономерностей контактного взаимодействия инструмента с изделием при любых процессах ХПД.

Установлено, что при обработке углеродистых инструменталь-

ных сталей инструментом с TiN - и CrN - покрытиями шероховатость обрабатываемой поверхности не влияет на величину f в отличие от обработки заготовок из конструкционных сталей. При использовании нитридных КИБ-покрытий напряжение контактного трения τ_n значительно слабее зависит от величины контактного давления q_f , чем при использовании других исследованных инструментальных материалов.

Для детонационных покрытий из ВК15В закономерности контактного трения оказались такими же, как и для твердосплавного инструмента из ВК15.

Для ЭИЛ - покрытий из ВК20 коэффициент трения во всех случаях оказался больше, чем для твердого сплава и других исследованных покрытий, причем он не зависит от шероховатости обрабатываемой поверхности. Это обусловлено большой высотой микронеровностей самого ЭИЛ - покрытия. При достижении q_f величины в 3 - 4 МПа рост контактных сил трения практически прекращается, т.к. из-за низкой твердости ЭИЛ - покрытие теряет свою несущую способность и начинает играть роль промежуточного пластического слоя.

Статистической обработкой экспериментальных данных полученных степенные зависимости для расчета f при ДПР инструментом с износостойкими покрытиями заготовок из различных материалов.

Анализ доли работы трения в общей работе ДПР выявил области фрикционных преимуществ TiN - и CrN - покрытий и твердого сплава в зависимости от q_f и R_a обрабатываемой поверхности. В большей части исследованного диапазона этих параметров инструмент с покрытиями обеспечивает меньшие силы трения, чем инструмент из твердого сплава.

Выполнены экспериментальные исследования сил ДПР инструментом с износостойкими покрытиями заготовок из различных материалов. Показано, что их отличие от сил ДПР твердосплавным инструментом обусловлено лишь различием фрикционных свойств.

Экспериментальные исследования сил при ДПР многослойных заготовок показали, что их зависимость от параметров процесса носит сложный, а иногда и неоднозначный характер из-за проскальзывания слоев заготовки. Аппроксимацией опытных данных получена формула для силы ДПР двухслойной заготовки. В технологических расчетах можно принять, что многослойность уменьшает силу на 15%.

Седьмой раздел посвящен исследованию качества обработки при ДПР.

Пластичность обрабатываемых заготовок и способы технологического обеспечения данного параметра качества изделий изучались на основе выполненных исследований их НДС. Получена аналитическая функция $\eta(\bar{\epsilon}_0)$, характеризующая историю деформирования на наружной поверхности заготовок. Анализ истории деформирования при различных режимах ДПР позволил получить ее идеализированную схему. Сначала во внеконтактной зоне перед инструментом накопленная деформация принимает значение $\bar{\epsilon}_0 = \Delta \bar{\epsilon}_0$ при отрицательном η . Затем η скачком возрастает до +2 и деформация при таком его значении возрастает на величину приведенной деформации $\bar{\epsilon}_0''$. После скачкообразного уменьшения η до отрицательных значений приращение накопленной деформации опять равно $\Delta \bar{\epsilon}_0$.

Статистической обработкой экспериментальных данных получена формула для расчета приведенной деформации при прохождении одного деформирующего элемента: $\bar{\epsilon}_0'' = \bar{\sigma} / (1 + \bar{t}_0)$, где $\bar{\sigma} = a/d_0$ — относительный натяг, $\bar{t}_0 = 2t_0/d_0$ — относительная толщина стенки заготовки.

Как показано в разделе 3, основное накопление повреждений происходит в зоне с $\eta = +2$. Экспериментально установлено, что для достаточно широкого круга материалов пластичность при $\eta = +2$ связана со стандартной механической характеристикой — относительным удлинением при разрыве: $\epsilon_{нр} (+2) = 0,65 \delta_p$.

На основе критерия В.Л. Колмогорова получено выражение для использованного запаса пластичности при ДПР одним деформирующим элементом

При ДПР многоэлементной протяжки с постоянным на каждом элементе натягом историю деформирования с достаточной точностью можно аппроксимировать циклически повторяющимся графиком $\eta(\bar{\epsilon}_0)$, полученным для одного цикла деформирования. На основе тензорного описания накопления повреждений, предложенного Г.Д. Делем, и аппроксимации экспериментальных данных получена формула для расчета степени использования запаса пластичности:

$$\Psi = \left\{ -1 + \sqrt{1 + 4[Kz + (1 + 2\alpha)(Kz)^2]} \right\} / 2, \quad (1)$$

где $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_0 / \epsilon_{пр} (1+2)$; $\alpha = \Delta \bar{\epsilon}_0 / \bar{\epsilon}_0 = -1,8\delta - 0,17\bar{\epsilon}_0 + 0,38$.

Для предотвращения разрушения необходимо, чтобы выполнялось условие $\Psi < 1$.

Из условия разрушения получена формула для расчета предельного числа деформирующихся элементов при заданных геометрических параметрах заготовки, характеристике пластичности и натяге на деформирующий элемент: $K = [-1 + \sqrt{1 + 8(1 + 2\alpha)}] / 2 \bar{\epsilon} (1 + 2\alpha)$.

Для удобства практического пользования данная зависимость представлена в виде номограммы – рис.6. Экспериментальная проверка полученного решения показала, что ошибка, допускаемая при его использовании, не превышает 20%.

Для тех случаев, когда назначается допустимое значение степени использованного запаса пластичности, получено аналитическое решение обратной задачи – т.е. когда задано число элементов протяжки и требуется определить натяг, при котором степень использования запаса пластичности будет равна заданной.

На основании тензорного описания исследована анизотропия остаточной пластичности детали, обработанной ДПР. Установлено, что наибольшей является остаточная пластичность при растяжении образца, вырезанного из обработанной детали в радиальном направлении, а наименьшей – в окружном. Результаты расчетов остаточной пластичности в осевом и в окружном направлениях подтверждены экспериментально.

Разработана методика оценки вероятности разрушения заготовки при ДПР, с помощью которой можно рассчитать вероятность разрушения при заданных режимах обработки и при известном рассеянии значений остаточного удлинения при разрыве, значения которого приводятся в справочной литературе.

На основании анализа разработанной теоретической модели НДС заготовок с бесконечной толщиной стенки установлено, что основное накопление повреждений у обрабатываемой поверхности происходит в зоне внеконтактной деформации перед инструментом при постоянном значении $\eta = -1,73$. На основании экспериментального изучения деформированного состояния предложена формула для расчета степени использованной пластичности поверхности, обработанной одним деформирующим элементом: $\Psi = \Delta \bar{\epsilon}_{0\max} / [3 \cdot \epsilon_{пр} (-1,73)]$, где $\Delta \bar{\epsilon}_{0\max}$ – локальная накопленная деформация; $\epsilon_{пр} (-1,73)$ – пре-

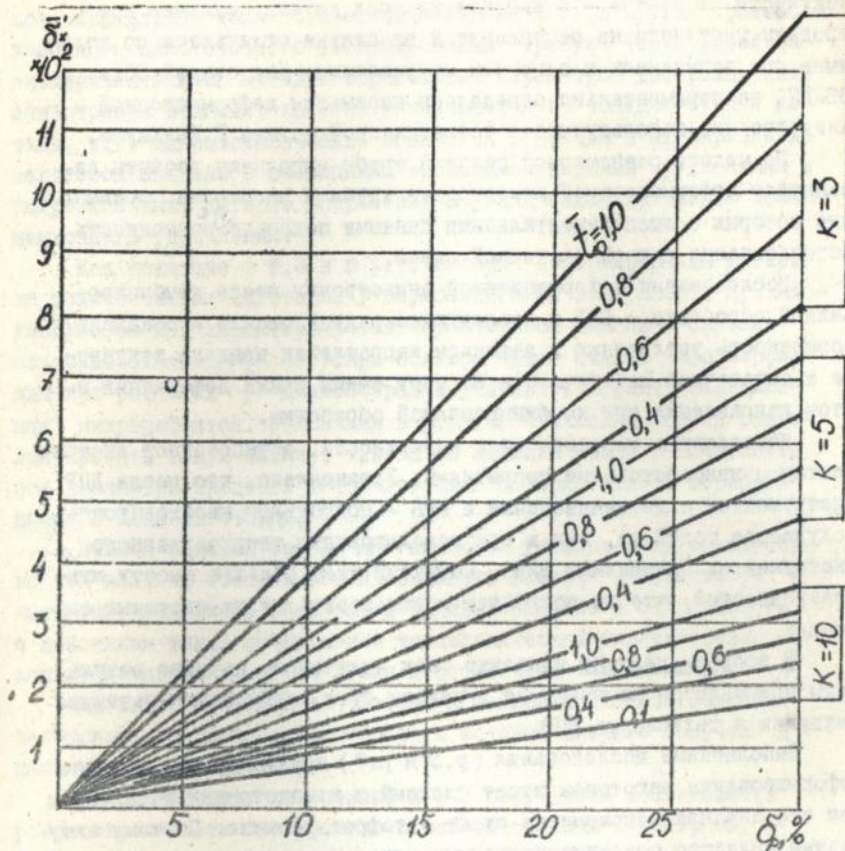


Рис. 6. Номограмма для определения предельных технологических параметров при деформирующем протягивании

дельная деформация при $\nu = -1,73$.

Экспериментально установлено, что после ДПР материал детали обладает сильной деформационной анизотропией. Предел текучести на растяжение максимален в окружном направлении, а предел

текучести на сжатие — в направлении оси детали. Сильнее всего пределы текучести на растяжение и на сжатие отличаются по величине при испытаниях в окружном направлении. Для сталей 35 и ЗДХТСА экспериментально определены параметры деформационной анизотропии, используемые в теоретической модели Г.Бакхауза.

По модели равномерной раздачи трубы выполнены расчеты параметров деформационной анизотропии трубной заготовки, сравнение которых с экспериментальными данными показало возможность использования данной расчетной схемы.

Исследования деформационной анизотропии после комбинированной обработки — ДПР и последующее редуцирование — показали возможность увеличения в заданном направлении предела текучести и остаточной пластичности за счет смены знака деформации в этом направлении при комбинированной обработке.

Исследована шероховатость поверхности, обработанной инструментом с износостойкими покрытиями. Установлено, что после ДПР инструментом с детонационными и КИБ — покрытиями шероховатость получается такой же, как и при использовании твердосплавного инструмента. Применение ЭИЛ — покрытий дает большую высоту микронеровностей, что не позволяет использовать их на чистовых операциях.

В восьмом разделе показано как полученные научные результаты применяются на практике и каковы пути дальнейшего развития механики и технологии ДПР.

Выполненные исследования (р.3 и р.7) показали, что процесс деформирования заготовок носит сложный и немонотонный характер и для его анализа неприемлема схема автофретирования. Поэтому актуальным является создание расчетных методов исследования механики ДПР заготовок с конечной толщиной стенки. Это позволит теоретически моделировать влияние технологических режимов на такие параметры качества изделия как пластичность и деформационное упрочнение. Последнее важно для оптимизации операции ДПР — оптимального сочетания технологической наследственности деталей по параметрам деформационной анизотропии с переменным по их объему напряженным состоянием, возникающим от действия эксплуатационных нагрузок, с целью обеспечения максимального запаса прочности изделий. Дан-

ное направление технологической механики ДПР и других процессов холодного пластического деформирования требует также развития экспериментальных методов определения параметров деформационной анизотропии изделия, заметно изменяющихся по толщине стенки детали, т.к. микромеханические испытания образцов и их вырезка из заготовок связано с очевидными экспериментальными трудностями и погрешностями, которые возрастают с увеличением градиента деформационного упрочнения.

Как показано в р.3 и в р.7, история деформирования материала толстостенных заготовок у обрабатываемой поверхности при многоцикловом ДПР характеризуется чередованием циклов с сильным объемным сжатием ($\nu \approx -7$). При большом числе циклов деформирования при раслетах ψ целесообразно учитывать эффект "залечивания" микродефектов. Описанная в р.3 теоретическая модель позволяет решать такую задачу, т.к. с ее помощью можно рассчитывать все параметры процесса деформирования поверхностного обрабатываемого слоя заготовки.

Важной задачей теории ДПР является установление закономерностей влияния степени использованного ресурса пластичности ψ на эксплуатационные свойства деталей, особенно в совокупности с действием таких показателей технологической наследственности, как деформационная анизотропия и остаточные напряжения.

Дальнейшего развития требует и механика ДПР многослойных заготовок, основные закономерности которой впервые получены в настоящей работе (р.4).

Как показывают полученные в р.5 результаты исследований работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями, а также данные, полученные Б.А.Ляшенко, О.В.Цыгулевым и др., перспективным является создание дискретной структуры таких покрытий. Такое их строение снижает уровень неблагоприятных растягивающих напряжений, возникающих в покрытии в самом начале ширины контакта. Причем инструмент может иметь дискретное покрытие только в этой области рабочей поверхности.

Во втором подразделе приведены инженерные методики назначения режимов обработки, новым элементом которых является использование полученных зависимостей, устанавливающих связь между параметрами пластичности и упрочнения с технологическими па-

параметрами ДПР, основными из которых являются число деформируемых элементов протяжки и величина натяга на каждом из них. Рассмотрены различные варианты технологической задачи обеспечения качества обработки по параметрам пластичности и упрочнения.

Например, при проектировании операции ДПР на наружной поверхности заготовки требуется обеспечить требуемую величину степени использования ресурса пластичности $\Psi = [\Psi]$, а также достигнуть необходимой шероховатости обработанной поверхности. Для достижения высокой точности отверстия заготовки диаметры деформирующих элементов протяжки $d_{k,i}$ по существующим методикам выбираются так, чтобы номинальные натяги на них уменьшались по закону близкому к геометрической прогрессии с параметром $M: a_i = \frac{a_{i-1}}{M}$. Суммарный натяг

$$\sum a = a_1(1 - M^{-K}) / (1 - M^{-1}) \quad (2)$$

назначается из условия получения требуемого диаметра обработанного отверстия, а натяг на первый элемент a_1 - из условия обеспечения его гарантированной минимальной величины $d_i^{min}: a_i = a_1^{min} + \frac{1}{2}(d_o^{max} - d_o^{min})$.

На рис. 7 представлен алгоритм решения данной задачи с применением ЭВМ. Задача решается последовательно, начиная с некоторого числа деформирующих элементов $K = K_0$. В каждом расчетном цикле параметр M находится численным решением уравнения (2) с помощью подпрограммы (ПП1 M). Текущие параметры геометрии детали:

$$d_{o,i} = d_{k,i}; \quad D_{o,i} = D_{o,i-1} + a_i(2,5 - \frac{1}{2} \frac{D_{o,i}}{d_{o,i}}) / (1,5 + \frac{1}{2} \frac{D_{o,i}}{d_{o,i}}).$$

Рассчитываются приращения компонент тензора ресурса использованной пластичности:

$$\Delta \Psi_{m,i} = (K_1 - K_2 / 12) \sqrt{\frac{1}{2} [(i-1) + (2i-1)\alpha_i] z_i + \frac{1}{2} (K_1 - \frac{K_2}{12}) z_i^2}; \quad \Delta \Psi_{e,i} = \dots;$$

и накопленные значения Ψ_m , Ψ_e и Ψ .

В конце каждого цикла проверяется условие обеспечения требуемого запаса пластичности и необходимой шероховатости обработанной поверхности.

При ДПР многоэлементной протяжкой с постоянным на каждом элементе натягом $a_i = a$ число элементов, обеспечивающих у детали заданную величину $[\Psi]$, находится из (1) решением этого уравнения относительно K .

Приведены также примеры решения технологических задач проектирования операции ДПР.

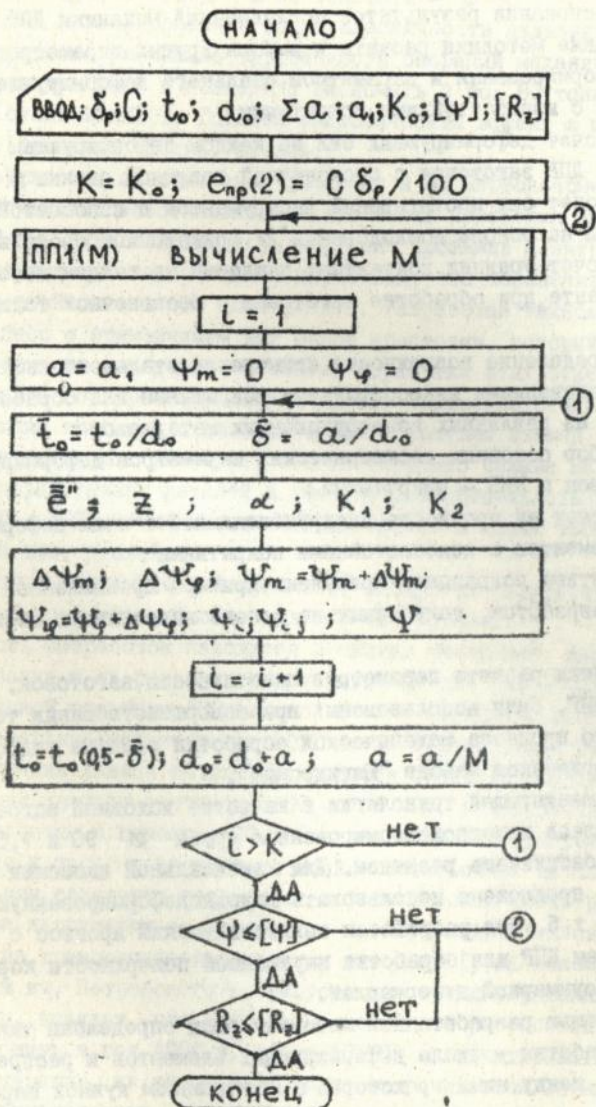


Рис. 7.

Алгоритм проектирования технологической операции деформирующего протягивания

На основании результатов исследований механики ДПР предложены также методики расчета и выбора других параметров процесса деформирования и параметров стального деформирующего инструмента с износостойкими покрытиями:

- расчет деформирующих сил на каждом деформирующем элементе при ДПР заготовок с бесконечной толщиной стенки;
- расчет сил протягивания инструментом с износостойкими покрытиями на основе исследования их фрикционных свойств;
- расчет средних контактных давлений на каждом деформирующем элементе при обработке заготовок с бесконечной толщиной стенки;
- определение возможности применения стального инструмента с исследованными износостойкими покрытиями для обработки заготовок из различных конструкционных материалов;
- выбор основных геометрических параметров деформирующих прошивок с КИБ - покрытиями;
- расчет на прочность инструментальной основы деформирующих элементов с износостойкими покрытиями.

В третьем подразделе приведены примеры промышленной реализации разработок, полученных на основе выполненных исследований.

Методики расчета параметров пластичности заготовок, обработанных ДПР, были использованы при совершенствовании технологического процесса механической обработки корпуса гидронасоса на Бердянском заводе "Южгидромаш".

По существующей технологии в качестве исходной заготовки использовалась холоднодеформированная труба $\varnothing 90 \times 7,5$, которая обрабатывалась резанием. Для максимальной экономии металла было предложено использовать холоднодеформированную трубу $\varnothing 85 \times 5$. Был разработан технологический процесс с использованием ДПР для обработки внутренней поверхности корпуса с большой суммарной деформацией.

С помощью разработанной методики были определены такие режимы обработки - число деформирующих элементов и распределение натяга между ними, которые с достижением нужной шерохо-

ватости - $R_a(0,12-0,15)$ - и по точности - $\varnothing 80^{+}(0,02-0,05)$ - обеспечили гарантированный запас пластичности изделия. Внедрение разработки уменьшило трудоемкость операций механической обработки в три раза и позволило экономить в год 80 тонн нержавеющей стали X18H10T. Годовой экономический эффект в ценах 1988 г. составил 75 тыс. рублей.

Результаты исследований внедрены и на Червонсармейском РТП в процессе восстановления изношенных крестовин автомобилей ГАЗ-53. Были созданы деформирующие прошивки с нитриidotитановым покрытием, легированным цирконием, что обеспечило максимальную стойкость этого инструмента. Разработан технологический процесс с применением ДПР шипов крестовин, который позволяет достигать требуемого качества обработки этих ответственных деталей по параметру пластичности. Внедрение стальных деформирующих прошивок с износостойким покрытием взамен твердооплавных позволило экономить 300 г. твердого сплава BK15 на 1 тыс. обработанных деталей и уменьшить энергоемкость процесса на 15 - 20%. Общий экономический эффект в ценах 1986 г. составил 95 тыс. рублей.

Полный экономический эффект от внедрения результатов выполненных исследований составил 165 тыс. рублей.

Часть разработок находится в стадии внедрения. Выполненные исследования и их результаты использованы для разработки технологической операции ДПР шахтной стойки механизированной крепи, изготавливаемой из стали ЗОХГСА. По существующей технологии получения данной детали применяется операция закалки для достижения предела текучести 600 - 700 МПа. Разработанные режимы обработки с помощью ДПР позволяют получать требуемое упрочнение и запас пластичности этой ответственной детали при оптимальном сочетании параметров деформационной анизотропии с условиями нагружения стойки при ее эксплуатации. Анализ производства по трем машиностроительным заводам (Дружковском, Каменском и им. Петровского), выпускающим механизированные шахтные крепи, показал, что использование данной разработки позволит экономить в год 4000 т. стали ЗОХГСА и ликвидировать термическую операцию, на которую ежегодно затрачивается 200 млн. квт. часов электроэнергии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований механики обрабатываемых заготовок решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение для повышения качества и технологической надежности обработки деталей машин деформирующим протягиванием и заключающаяся в установлении технологических закономерностей механики процесса, создании методов расчета и технологического обеспечения качества обработки по параметрам пластичности и упрочнения, повышении работоспособности стального деформирующего инструмента с износостойкими покрытиями, разработке и промышленной реализации принципов совершенствования технологии ДПР. Более детально выводы формулируются следующим образом:

1. Изучено влияние технологических параметров ДПР на механику обрабатываемых заготовок. Для заготовок с бесконечной толщиной стенки установлено, что в очаге деформации деформированное состояние можно считать плоским, материал находится в условиях сильного объемного сжатия, а НДС не соответствует схеме автофреттирования. Локальное деформированное состояние, возникающее в зоне контакта, зависит только от геометрии инструмента. С помощью разработанной теоретической модели многоциклового деформирующего протягивания установлена связь между режимами обработки и всеми параметрами процесса деформирования заготовки. Показано, что градиент упрочнения обрабатываемого поверхностного слоя вызывает вдоль линий скольжения дополнительное изменение гидростатического давления, что приводит к его уменьшению от начала к концу ширины контакта.

Для заготовок с конечной толщиной стенки с помощью полученного решения для скоростей пластического течения исследована механика по всему объему деталей. Установлено, что напряженное состояние имеет сложный и немонотонный характер — в зоне контакта оно соответствует объемному сжатию, что противоречит схеме автофреттирования. Деформированное состояние не зависит от материала заготовки, а на наружной поверхности оно определяется лишь толщиной стенки и величиной натяга. Напряжения на наружной поверхности не зависят от схемы обработки и угла рабочего конуса инструмента и изменяются по циклам: двухосное сжатие—равно-

мерное двухосное растяжение—двухосное сжатие.

2. Разработана расчетная схема равномерной раздачи однослойных и многослойных заготовок в условиях нестесненной осевой деформации. До степени раздачи 0,15 результаты расчетов изменения размеров заготовок по данной модели согласуются с экспериментальными данными, полученными при ДПР.

3. Исследована механика ДПР многослойных заготовок. Процесс деформирования наружного слоя приближается к схеме равномерной раздачи труб в условиях нестесненной осевой деформации. В зависимости от режимов обработки внутренний слой может как укорачиваться, так и удлиняться, а изменение его размеров зависит от материала заготовки, что обусловлено трением между слоями, которое оказывает существенное влияние на механику ДПР многослойных заготовок. Зависимость ширины контакта и коэффициента трения от контактного давления такие же, как и при обработке однослойных заготовок.

4. Исследовано влияние технологических параметров на пластичность обрабатываемых заготовок.

Использованный ресурс пластичности максимален на наружной поверхности заготовок с конечной толщиной стенки, где наиболее вероятно начало их разрушения. Основное накопление повреждений происходит здесь в условиях равномерного двухосного растяжения, что позволило с помощью аппроксимации экспериментальных данных аналитически описать зависимость истории деформирования от технологических параметров ДПР. На основе тензорного описания накопления повреждений и изученных технологических закономерностей истории деформирования разработана теоретическая модель пластичности заготовок.

Разработана методика оценки остаточной пластичности деталей, обработанных ДПР, учитывающая анизотропию этого параметра качества.

Для заготовок с бесконечной толщиной стенки установлено, что при их обработке основное накопление повреждений происходит на обрабатываемой поверхности перед инструментом при постоянной схеме напряженного состояния, соответствующей сжатию в условиях плоской деформации. Получена зависимость для расчета ресурса ис-

пользованной пластичности обработанного поверхностного слоя заготовки.

5. Установлено, что материал детали, обработанной деформирующим протягиванием, обладает заметной деформационной анизотропией. Предел текучести на растяжение максимален в окружном направлении, предел текучести на сжатие — в осевом, а пределы текучести на растяжение и на сжатие сильнее всего отличаются в осевом направлении. Сравнение параметров деформационной анизотропии, найденных экспериментально и расчетным методом по схеме равномерной раздачи, показало невозможность использования данной расчетной схемы для исследования упрочнений заготовок при ДПР. Изучение процесса ДПР с последующим редуцированием показало возможность увеличения в заданном направлении пределов текучести и остаточной пластичности за счет изменения знака деформации в этом направлении при комбинированной обработке.

6. Разработаны инженерные методики назначения режимов ДПР, обеспечивающих качество обработки по параметрам пластичности и деформационного упрочнения, и рассмотрены различные варианты соответствующих технологических задач.

7. Установлены основные закономерности контактного взаимодействия инструмента с изделием. При ДПР заготовок с бесконечной толщиной стенки максимум контактных давлений находится в начале ширины контакта, а с увеличением неравномерности упрочнения по глубине обработанного поверхностного слоя неравномерность распределения контактных давлений растет. При обработке заготовок с конечной толщиной стенки максимум контактных давлений находится в точке, которая с уменьшением толщины стенки заготовки перемещается от начала к концу ширины контакта. При обработке тонкостенных деталей контактные давления монотонно увеличиваются от начала к концу ширины контакта, а их величина пропорциональна толщине стенки заготовки. Разработанная теоретическая модель для формы внеконтактной деформации перед инструментом позволила выявить влияние технологических параметров на длину переходной зоны эпюры контактных давлений.

8. Выполнены исследования, направленные на повышение работоспособности стального инструмента с износостойкими покрытиями.

Разработан теоретический метод определения напряжений в тонких покрытиях, с помощью которого показана возможность влияния на их НДС за счет оптимального сочетания упругих свойств материалов покрытия и основы. Разработана методика моделирования условий работы покрытий, которая в сочетании со структурными исследованиями позволяла оптимизировать свойства и режимы нанесения различных покрытий с целью достижения их максимальной стойкости. Анализ прочности сплошных детонационных и КИС-покрытий, выполненный на основе изученных закономерностей контактного взаимодействия, а также исследования закономерностей их изнашивания показали, что вид износа в разных местах контакта зависит от характера НДС покрытий в этих зонах, а доминирующим является износ из-за хрупкого разрушения в условиях малоциклового усталости в начале ширины контакта. Износ дискретных ЭИД-покрытий по всей поверхности контакта имеет адгезионную природу. Анализ НДС инструментальной основы деформирующей прошивки позволил установить связь между режимами обработки и условием ее прочности.

9. Изучены технологические свойства разработанных покрытий: фрикционные, стойкость против схватывания, шероховатость обработанной поверхности, получены стойкостные диаграммы, определяющие работоспособность покрытий. Разработаны конструкторские и технологические рекомендации по повышению работоспособности инструмента с покрытиями и определены рациональные области их применения.

10. Выполнены исследования сил ДПР. Разработана теоретическая модель сил при обработке заготовок с бесконечной толщиной стенки. Экспериментально исследованы силы ДПР инструментом с покрытиями.

11. Результаты работы прошли промышленную апробацию и легли в основу разработки эффективных технологических процессов. Общий экономический эффект от их промышленного внедрения составил 165 тыс. руб. в ценах 1988 г.

По теме диссертации имеется 51 публикация основными являются:

1. Цеханов Ю.А. Анализ напряженного состояния в контактной зоне при деформирующем протягивании // Повышение эффективности протягивания. - Рига: РПИ, 1988. - С. 90 - 93.

2. Цеханов Ю.А. Напряженное состояние при деформирующем протягивании толстостенной трубы // Изв. вузов. Машиностр. - 1976. - №5. - С. 153 - 156.

3. Цеханов Ю.А., Розенберг О.А. Напряженное состояние при

деформирующем протягивании тонкостенных труб// Изв. вузов. Машиностроение. - 1975. - №4. - С. 140 - 145.

4. Цеханов Ю.А. Напряженное состояние толстостенных труб при многоцикловом деформирующем протягивании// Проблемы прочности. - 1992. - №6. - С. 26 - 33.

5. Цеханов Ю.А., Соловьев О.В. Оценка деформируемости при протягивании трубных заготовок// Сверхтвердые и тугоплавкие материалы. Киев: ИСМ АН УССР, 1982. - С. 132 - 134.

6. Соловьев О.В., Цеханов Ю.А. Выбор оптимальных технологических параметров при деформирующем протягивании// Моделирование и оптимизация сложных систем.- Воронеж: ВПИ, 1982. - С. 76 - 80.

7. Цеханов Ю.А., Розенберг О.А. Определение коэффициента пластического трения с помощью линий скольжения при деформирующем протягивании// Кузн.-штамп. производство. - 1977. - №2. - С. 18 - 19.

8. Дель Г.Д., Соловьев О.В., Цеханов Ю.А. Исследование напряжений и деформаций в заготовках при деформирующем протягивании// Повышение эффективности протягивания. Качество обработки. - Рига: Риж. политехн. ин-т, 1990. - С.82 - 88.

9. Цеханов Ю.А., Эйдельман Ю.С., Сологуб В.Э. Особенности напряженного состояния покрытий деформирующего инструмента на границах контактных участков. - Воронеж, 1989. - 5 с. - Деп. в ВИНТИ 14.11.89, № 6817 - В 89.

10. Цеханов Ю.А. К оценке точности изготовления деталей переменной толщины, обрабатываемых деформирующим протягиванием// Прикладная механика. - 1978. - Т.4. - №7. - С. 131 - 136.

11. Цеханов Ю.А., Розенберг О.А. Расчет силы при деформирующем протягивании// Известия вузов.Машиностроение. - 1979. - №7. - С. 99 - 103.

12. Дель Г.Д., Розенберг О.А., Соловьев О.В., Цеханов Ю.А. Прочность трубчатых заготовок при циклической раздаче// Проблемы прочности. - 1991. - №8. - С. 81 - 85.

13. Цеханов Ю.А., Розенберг О.А., Дель Г.Д. Тяговое усилие при деформирующем протягивании// Известия вузов. Машиностроение. - 1975. - Т.11. - Вып. 10. - С. 133 - 137.

14. Цеханов Ю.А., Соловьев О.В. Оценка деформируемости при деформирующем протягивании тонкостенных труб//Синтез и применение

- ние сверхтвердых материалов. - Киев: АН УССР, 1981. - С. 77 - 79.
15. Хван Д.В., Розенберг О.А., Цеханов Ю.А. Исследование деформационной анизотропии металлов при немонотонном пластическом деформировании в условиях линейного напряженного состояния// Проблемы прочности. - 1991. - №12. - С. 53 - 56.
16. Дель Г.Д., Соловьев О.В., Цеханов Ю.А. Остаточная пластичность заготовок после деформирующего протягивания// Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства. - Тула: Тульск. политехн. ин-т, 1989. - С. 29 - 33.
17. Цеханов Ю.А., Розенберг О.А., Шейкин С.Е. и др. Оптимизация свойств износостойких покрытий на инструменте путем моделирования условий его работы// Новые процессы получения и обработки металлических материалов: Тез. докл. Совещания по направлению 2.25.1.1. - Воронеж, 1990. - С.25.
18. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Немировский Я.Б. Исследование деформирования трубы в зонах вне контакта при протягивании// Прикладная механика. - 1983. - Т.10. - №10. - С. 78 - 83.
19. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е. и др. Повышение работоспособности деформирующих протяжек// Сверхтвердые материалы.-1990. - №2. - С. 32 - 39.
20. Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е., Полотняк С.Б. О напряженном состоянии износостойких покрытий на рабочих элементах деформирующих протяжек// Физические явления при резании и холодном пластическом деформировании металлов. - Киев: ИСМ АН УССР, 1988. - С. 132 - 143.
21. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Царенко И.В. О работоспособности инструмента с детонационным покрытием для деформирующего протягивания// Сверхтвердые материалы. - 1991. - №4. - С. 43 - 48.
22. Розенберг О.А., Ростоцкий Ю.С., Делеви В.Г., Цеханов Ю.А. Повышение работоспособности стальных рабочих элементов деформирующих протяжек электроискровым легированием// Сверхтвердые материалы. - 1992. - №2. - С. 41 - 48.
23. Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е., Ростоцкий Ю.С. О стойкости рабочих элементов деформирующих протяжек с износостойкими покрытиями// Сб. научн. трудов. - Киев: ИСМ АН Украины, 1991. - С. 150 - 154.

24. О.А.Розенберг, Ю.А.Цеханов, С.Е.Шейкин.

Wissenschaftliche Grundlagen für die Entwicklung verschleißfester, beschichteter Kaltumformwerkzeuge. / Wiss. Z. Techn. Univ. Magdeburg. 33 (1989), Heft 8, s. 24-28.

25. А.с. № 1171694 СССР. Устройство для измерения границ фактического контакта инструмента с деталью при волочении и раздате / А.М.Розенберг, О.А.Розенберг, Ю.А.Цеханов и др. - Оpubл. 07.08.85, Бюл. № 29.

26. А.с. № 1670523 СССР. Способ определения коэффициента трения и/или акранирующих свойств технологических смазок при холодном пластическом деформировании / О.А.Розенберг, Ю.А.Цеханов, Ю.С.Ростоцкий и др. - Оpubл. 15.04.91, Бюл.20.

27. А.с. № 1719933 СССР. Динамометр для определения контактных давлений / О.А.Розенберг, Ю.А.Цеханов, С.Е.Шейкин и др. - Оpubл. 15.03.92, Бюл. № 10.

28. А.с. № 1516902 СССР. Способ определения прочностных свойств покрытий / Ю.А.Цеханов, О.А.Розенберг, С.Е.Шейкин. - Оpubл. 23.10.89, Бюл. № 39.

29. Заявка 4740181 СССР. Способ определения стойкостных характеристик инструмента для холодного пластического деформирования / Ю.А.Цеханов, О.А.Розенберг, С.Е.Шейкин и др. - Положит. решение от 28.10.91.

30. Заявка 4297328 СССР. Способ определения прочности сцепления покрытий с основой / Ю.А.Цеханов, С.Е.Шейкин, О.А.Розенберг. - Положит. решение от 10.08.89.

31. Заявка 4741031 СССР. Устройство для определения контактных напряжений в зоне обработки при деформирующем протягивании / С.Е.Шейкин, О.А.Розенберг, Ю.А.Цеханов и др. - Положит. решение от 28.01.91.

32. Заявка 4640784 СССР. Деформирующий элемент протяжки / О.О.Ряско, А.Л.Крицкий, Ю.А.Цеханов и др. - Положит. решение от 31.06.89.

Подписано в печать 18.05.93. Объем 2,0 усл.п.л. Тираж 110 экз. Заказ № 232

394026, г.Воронеж, Московский пр., 14

Участок оперативной полиграфии

Воронежского политехнического института