

На правах рукописи



ГРЯДУНОВ ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ

**УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВТУЛОК ИНТЕНСИВНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОГО
ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орёл
Государственный университет – УНПК
2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Научный руководитель – **Радченко Сергей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Корольков Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Самолётостроение»
Воронежского государственного
технического университета;
Булычёв Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент, ведущий
специалист ОАО «ЦКБА»

Ведущая организация: ЗАО «Мценскпрокат», г.Мценск

Защита состоится «23» декабря 2013г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: <http://gu-unpk.ru>.

Автореферат разослан «23» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борзенков М.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается тенденция к интенсификации условий эксплуатации узлов и деталей машин: они работают в условиях интенсивного трения, агрессивных сред и высоких изменяющихся температур, испытывают знакопеременную и импульсную нагрузку различного характера. В силу этого детали машин и конструкций должны обладать улучшенными прочностными и другими параметрами. Также необходимо отметить, что в отдельных случаях на изделия накладываются ограничения по массе и габаритам, что не позволяет увеличивать параметры прочности за счёт увеличения соответствующих размеров.

Примером таких изделий служат детали типа втулок, в частности – вкладыши подшипников скольжения. К материалу, из которого они изготавливаются, предъявляются дополнительные требования – он должен обладать хорошими антифрикционными свойствами.

Одним из перспективных методов упрочнения деталей машин является обработка металлов давлением (ОМД), где механизм упрочнения реализуется посредством фрагментации и разориентировки зёрен металла. Примером такой технологии служит валковая штамповка (ВШ), реализующая механизм интенсивной пластической деформации (ИПД) в виде многоциклового деформации заготовки в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

Значительный вклад в развитие теории и практики упрочняющей обработки деталей машин внесли работы Полевого С.Н., Голенкова В.А., Шнейдера Ю.Г., Одинцова Л.Г., Бриджмена П.В., Смелянского В.М., Браславского В.М., Бейгельзимера Я.Е., Монченко В.П., Олейника Н.В., Балтера М.А., Шевакина Ю.Ф., Поляка М.С., Горохова В.А., Папшева Д.Д., Осадчего В.Я., Малинина В.Г., Киричека А.В., Радченко С.Ю. Проводимые ранее исследования показали перспективность применения технологии валковой штамповки для получения деталей типа втулок с улучшенными параметрами прочности, в частности, из труднодеформируемых металлов и сплавов. Однако область упрочняющей обработки интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации исследована недостаточно, что сдерживает дальнейшее развитие технологии и её внедрение в производство.

В связи с этим повышение эксплуатационных характеристик деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения является весьма актуальной темой исследования.

Цель работы – получение деталей типа втулок высокого качества путём их упрочнения интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

Для достижения сформулированной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать способ упрочнения деталей типа втулок методом интенсивной пластической деформации в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

2. Разработать методику, экспериментальную оснастку и выполнить экспериментальные исследования предложенного способа с вариацией параметров технологического процесса обработки (количества циклов обработки n и шага осевой подачи S) с целью установления и оценки их влияния на параметры прочности (глубину упрочнения (h_{max}) и максимальную степень упрочнения (HV_{max})).

3. Разработать математическую модель исследуемого процесса. Выполнить аналитические исследования предложенной математической модели с целью выявления функциональных зависимостей между параметрами технологического процесса обработки (количеством циклов обработки n и шагом осевой подачи S) и параметрами прочности (глубиной упрочнения (h_{max}), максимальной степенью упрочнения (HV_{max})).

4. Разработать методику определения технологических параметров исследуемого способа в зависимости от требуемых параметров прочности готового изделия.

5. Разработать новые схемы упрочнения деталей типа втулок методом интенсивной пластической деформации в условиях комплексного локального нагружения очага деформации, позволяющих получать градиентное от внутренней поверхности упрочнение.

Объектом исследования является детали типа втулок.

Предметом исследования являются параметры технологического процесса упрочняющей обработки: количество циклов обработки n и шаг осевой подачи S и их влияние на параметры прочности деталей типа втулок: глубину упрочнённого слоя h_{max} и максимальную степень упрочнения HV_{max} .

Методология и методы исследования

Все исследования осуществлялись на основе системного подхода. В теоретических исследованиях использовались математическое моделирование исследуемого процесса с применением модификации скоростного вариационного принципа квазистатического равновесия системы контактирующих тел, явно включающего обобщённые координаты и силы для абсолютно жёстких тел, в пакете прикладных программ «Штамп». При проведении экспериментальных исследований применялись математико-статистические методы планирования эксперимента и обработки результатов, а также анализ полученных результатов с применением прикладного программного обеспечения MS Excel 2010.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. При проведении экспериментальных исследований влияния технологических параметров упрочняющей обработки на упрочнение материала деталей типа втулок путём создания градиентного от внутренней поверхности упрочнения методом интенсивной пластической деформации в условиях комплексного локального нагружения:

– установлена зависимость максимальной твёрдости HV_{max} материала исследуемых образцов от количества циклов обработки n и шага продольной подачи S инструмента, позволяющая заключить, что с увеличением количества циклов обработки увеличиваются глубина упрочнённой зоны и максимальная степень упрочнения. Изменение шага продольной подачи не приводит к значительному росту степени упрочнения;

– установлена зависимость максимальной толщины упрочнённого слоя h_{max} от количества циклов обработки n и шага продольной подачи S инструмента, позволяющая заключить, что с увеличением S происходит увеличение h_{max} ;

– выявлен характер изменения геометрических параметров заготовок в зависимости от технологических параметров обработки, позволяющий сделать вывод о том, что вариации технологических параметров не оказывают существенного влияния на геометрию обрабатываемых изделий.

2. Впервые разработана математическая модель упрочняющей обработки деталей типа втулок методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения, позволяющая выполнять расчёт осесимметричной задачи рассматриваемого процесса, по результатам аналитического исследования которой установлены:

– зависимость степени упрочнения HV_{max} (максимального значения параметра микротвёрдости) от количества циклов обработки n и шага осевой подачи S инструмента;

– зависимость толщины h_{max} упрочнённого слоя от шага осевой подачи S инструмента при постоянном количестве циклов обработки n ; при сравнении которых с результатами экспериментальных исследований установлена максимальная расхожимость результатов не более 11,8%, что позволяет судить об адекватности предложенной математической модели.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- применением научно-обоснованного метода планирования эксперимента и обработки полученных данных в пакете прикладных программ MS Excel 2010, применением прошедшего поверку лабораторного оборудования и контрольно-измерительных приборов;

- применением фундаментальных зависимостей, обоснованных ограничений и допущений, а так же корректной постановкой задачи математического моделирования, применением современных средств вычислительной техники. Результаты теоретического исследования качественно и количественно согласуются с данными экспериментальных исследований.

Научная значимость и практическая ценность полученных результатов:

Разработанная математическая модель и полученные при выполнении экспериментальных исследований зависимости изменения параметров прочности материала и установленный характер изменения геометрических параметров от параметров технологического процесса вносят вклад в дополнение теории обработки металлов давлением, а так же могут быть

использованы при выполнении теоретических расчётов, разработки методик и проектировании технологических процессов упрочняющей обработки.

Использование результатов работы. Результаты работы использованы:

1. Приняты к проектированию технологических процессов упрочняющей обработки деталей типа втулок на ЗАО «Мценскпрокат»;

2. При осуществлении учебного процесса для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Машиностроение».

Автор защищает:

1. Методику и результаты экспериментальных исследований по установлению зависимостей между параметрами технологического процесса упрочняющей обработки методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения очага деформации и параметрами получаемых изделий: зависимость степени упрочнения HV_{max} (максимального значения параметра микротвёрдости) от количества циклов обработки n и шага осевой подачи S инструмента; зависимость глубины проникновения h_{max} упрочнённой зоны от шага осевой подачи S инструмента при постоянном количестве проходов инструмента n ; характер изменения геометрических параметров заготовок в зависимости от технологических параметров обработки.

2. Математическую модель упрочняющей обработки полых осесимметричных деталей типа втулок, позволяющую выполнять расчёт осесимметричной задачи рассматриваемого процесса.

3. Разработанный способ повышения эксплуатационных характеристик деталей типа втулок методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения очага деформации и экспериментальную оснастку, реализующую его.

4. Методику определения параметров технологического процесса упрочняющей обработки полых осесимметричных деталей типа втулок.

5. Разработанные новые схемы осуществления технологического процесса упрочняющей обработки, реализующих рассматриваемый в данной работе способ упрочнения внутренней поверхности полых осесимметричных деталей типа втулок многоцикловым пластическим деформированием в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на кафедральных и межкафедральных конференциях и совещаниях, Российских и международных научно-практических конференциях в г. Орёл, г. Санкт-Петербург, г. Пржемысл в Польше, г. Мюнхен, Германия 2010–2013 гг.

Публикации по теме исследования. По теме диссертационного исследования опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для публикации трудов на соискание ученой степени кандидата и доктора наук», получен патент Российской Федерации на

изобретение «Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой».

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 71 наименования и приложений. Общий объём работы составляет 130 страниц основного текста, включает 54 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель работы, описана научная новизна, достоверность полученных результатов, представлена научная значимость и практическая ценность, а также сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

Первая глава посвящена анализу наиболее распространённых технологий упрочняющей обработки и вариантов конструктивного исполнения устройств для осуществления технологических процессов упрочнения, представлено их описание, выявлены достоинства и недостатки.

В главе подробно описаны способы упрочняющей обработки пластическим деформированием, такие, как:

– обработка выглаживающими прошивками, протяжками и выглаживателями;

– обработка одно- и многошариковыми раскатниками;

– обработка одно- и многороликовыми раскатниками;

– обработка ультразвуковым раскатыванием;

– обработка вибрационным раскатыванием;

приведена их сравнительная оценка. Рассмотрены новые перспективные способы упрочняющей ОМД, в частности – методы интенсивной пластической деформации; валковой штамповки; методы, основанные на ВШ.

Установлено, что существующие способы упрочняющей обработки не позволяют получать оптимальное распределение от внутренней поверхности эксплуатационных характеристик по сечению изделия. Однако, на основе данных проводимых в последнее время исследований, делается вывод о том, что наиболее перспективным методом в плане создания новых технологий упрочняющей обработки является валковая штамповка.

Принимая во внимание эти факты, ставится задача разработки нового способа упрочняющей обработки, основанного на методе ВШ.

Отмечены отечественные учёные, внёсшие значительный вклад в развитие технологий упрочняющей обработки пластическим деформированием: Полевогй С.Н., Голенков В.А., Шнейдер Ю.Г., Одинцов Л.Г., Бриджмен П.В., Смелянский В.М., Браславский В.М., Бейгельзимер Я.Е., Монченко В.П., Олейник Н.В., Балтер М.А., Шевакин Ю.Ф., Поляк М.С., Горохов В.А., Папшев Д.Д., Осадчий В.Я., Малинин В.Г., Киричек А.В., Радченко С.Ю.

Так же сформулированы задачи исследования исследований процесса повышения эксплуатационных характеристик деталей типа втулок

интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

Вторая глава посвящена разработке нового способа упрочняющей обработки (рисунок 1), экспериментальной оснастки (рисунок 2) и экспериментальному исследованию разработанного способа.

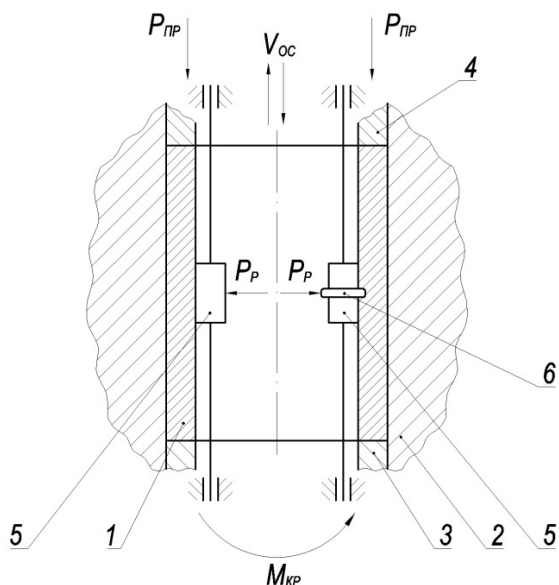


Рисунок 1 – Схема способа упрочняющей обработки внутренней поверхности многоцикловым комплексным локальным деформированием

1 – заготовка; 2 – контейнер; 3 – упор; 4 – прижим; 5 – ролики; 6 – деформирующий выступ

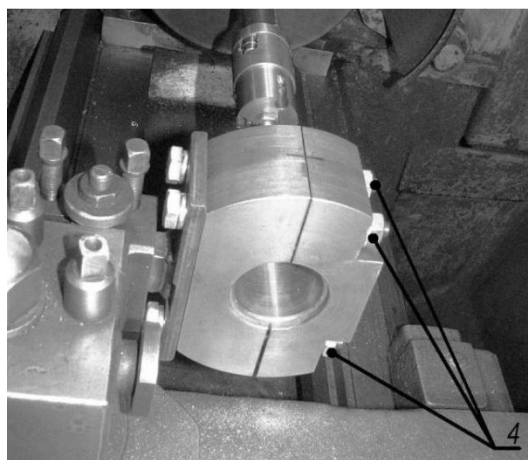
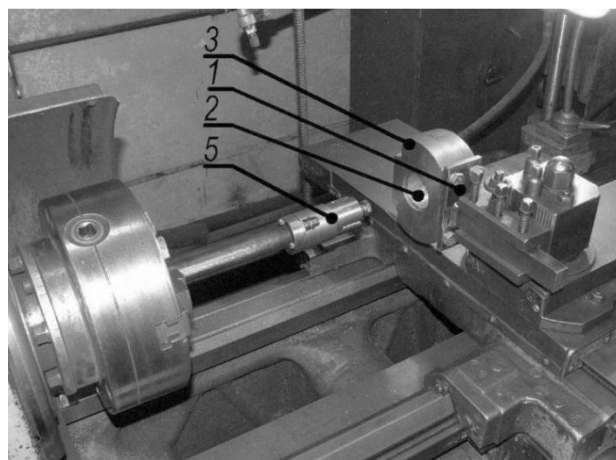


Рисунок 2 – Экспериментальная оснастка для исследования упрочняющей ВШ:

1 – контейнер, 2 – заготовка, 3 – крышка, 4 – затяжные гайки

Выбран материал для изготовления экспериментальных образцов – БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613–79), представляющих собой полые втулки, полученные дополнительным литьём и обточенные на токарном станке до размеров: $d_{внут.} = 50 \text{ мм}$, $D_{наруж.} = 70 \text{ мм}$.

После этого выполнялась обработка указанных втулок по рассматриваемому способу. В качестве параметра оценки эффективности принято изменение значений параметра микротвёрдости по сечению исследуемых образцов.

Экспериментальное исследование выполнялось на токарно-винторезном станке 16К20 с вариацией количественных параметров технологического процесса обработки: количества циклов обработки n и шага осевой подачи S .

В таблице 1 представлены данные измерения геометрических параметров экспериментальных образцов до и после обработки.

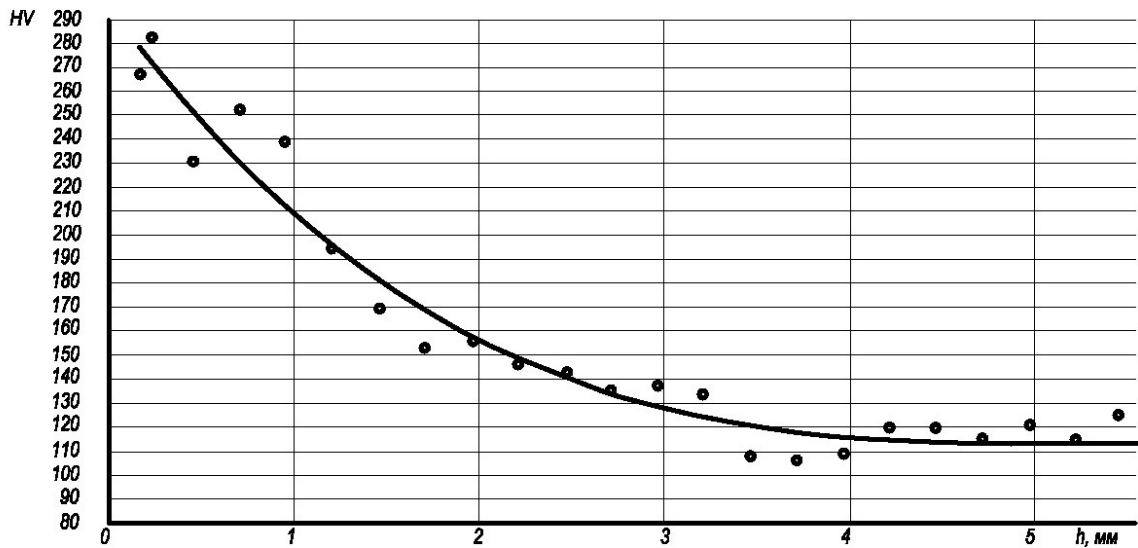
Таблица 1 – Изменение геометрических параметров заготовок

№ п/п	До обработки	Внутренний диаметр d, мм	Отклонение от круглости, мкм	После обработки	Внутренний диаметр d, мм	Отклонение от круглости, мкм
1		50	10.98		50	18.66
2		50	9.95		50	12.94
3		50	3.02		50	15.79
4		50	7.25		50	11.94
5		50	3.39		50	32.00
6		50	5.71		50	29.71

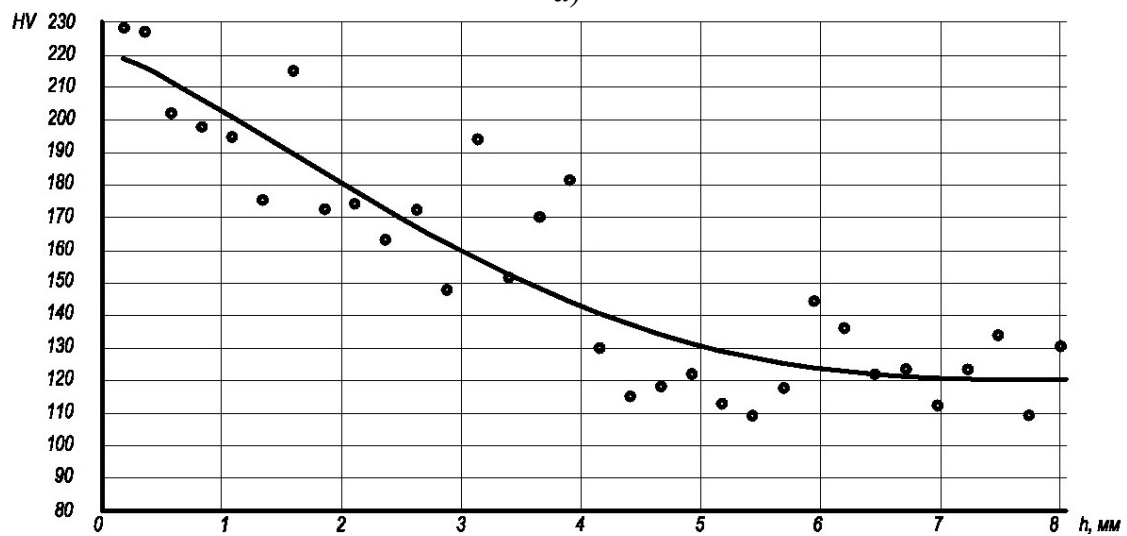
На рисунке 3 приведены данные экспериментальных исследований по обработке втулок $d_{внут.} = 50$ мм, $D_{наруж.} = 70$ мм из материала БрО5Ц5С5 с исходным значением параметра микротвёрдости $HV = 112.3$ в соответствии с рассматриваемым способом при шаге продольной подачи $S = 0.5$ мм, глубине внедрения $h_{внедр.} = 0.2$ мм и числом проходов $n = 30$ (рисунок 3, а) и $S = 0.7$ мм, $h_{внедр.} = 0.2$ мм и $n = 20$ (рисунок 3, б).

Третья глава посвящена математическому моделированию процесса повышения эксплуатационных характеристик деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

В главе рассмотрены свойства материала, подвергаемого обработке (БрО5Ц5С5). Приводится описание математического аппарата моделирования рассматриваемого способа упрочняющей обработки. Отмечено, что при выполнении расчётов необходимо решить осесимметричную задачу ОМД. В свою очередь, это позволит снизить машинное время, потребное для осуществления вычислений без значительной потери точности.



а)



б)

Рисунок 3 – Распределение параметра микротвёрдости по сечению исследуемых образцов при $h_{\text{внедр.}} = 0.2 \text{ мм}$ и: а) $n = 30, S = 0.5 \text{ мм}$; б) $n = 20, S = 1.0 \text{ мм}$

Осесимметричная модель рассматриваемого процесса приведена на рисунке 4.

Рассмотрим сечение А–А (рисунок 5). Процесс упрочняющей обработки в рассматриваемом сечении можно разделить на следующие этапы (см. рисунок 5):

- внедрение в заготовку 1 деформирующего ролика 2 по пути 4а на величину h . При этом заглаживающий ролик 3 отведён от заготовки 1;
- отвод деформирующего ролика 2 от заготовки 1 (путь 4а);
- заглаживание вытесненных масс металла роликом 3, перемещающимся по траектории 5 (ролик перемещается до уровня исходной поверхности заготовки);
- отход заглаживающего ролика 3 по траектории 5;
- смещение деформирующего ролика 2 в осевом направлении по траектории 4б на шаг подачи S .

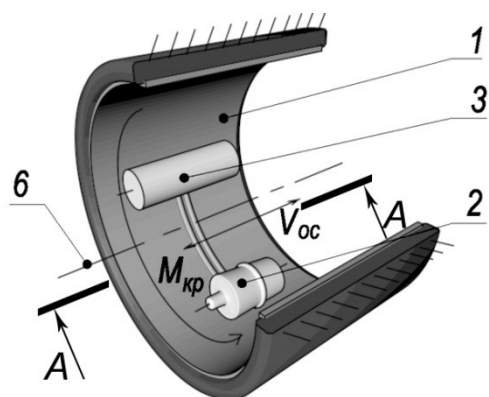


Рисунок 4 – Осесимметричная модель процесса упрочняющей обработки:

- 1 – заготовка,
- 2 – деформирующий ролик,
- 3 – заглаживающий ролик,
- 6 – ось симметрии

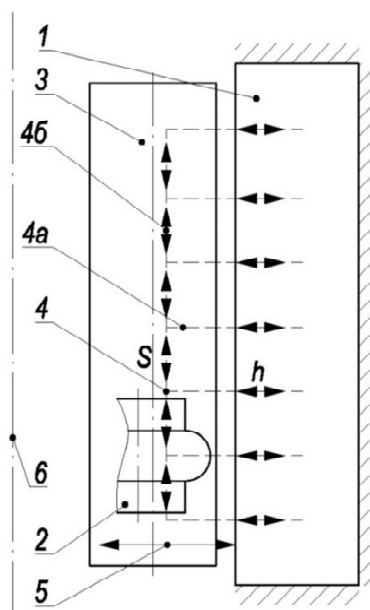


Рисунок 5 – Сечение А–А осесимметричной модели (см. рисунок 4):

- 1 – обрабатываемая заготовка;
- 2 – деформирующий ролик;
- 3 – заглаживающий ролик; 4 – траектория перемещения деформирующего ролика;
- 4а – траектория однократного внедрения деформирующего ролика на величину h ;
- 4б – траектория единичного смещения деформирующего ролика в продольном направлении на величину шага подачи S ;
- 5 – траектория движения заглаживающего ролика;
- 6 – ось симметрии

По достижении конца обрабатываемого участка смещение рабочего инструмента на шаг продольной подачи осуществляется в противоположном направлении. Описанные действия осуществляются до достижения заранее заданного количества циклов обработки.

В решаемой задаче были сформулированы следующие краевые условия:

- деформирующий инструмент принимаем недеформируемым и непроницаемым;
- торцы заготовки 1 неподвижны, т.е. отсутствует возможность её раздачи в осевом направлении;
- наружная поверхность заготовки ограничена поверхностью контейнера. Таким образом предотвращается возможность её радиальной раздачи в процессе обработки;
- отсутствие осевого и радиального смещения заготовки (следствие предыдущих двух пунктов).

Для математического моделирования рассматриваемого процесса применён ППП «ШТАМП» с применением модификации скоростного вариационного принципа квазистатического равновесия системы контактирующих тел, явно включающего обобщённые координаты и силы

для абсолютно жёстких тел и решением системы разрешающих уравнений для конечных элементов по методу Рунге-Кутты.

Применяется уравнение равновесия вида (1):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = 0 \quad (1)$$

В цикле работ, выполненных на кафедре «Автоматизированные процессы и машины бесстружковой обработки материалов» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», было доказано, что в случае контактных нагрузок, осуществляемых обрабатываемыми инструментами, считающимися абсолютно жёсткими, допускается следующая вариационная формулировка (2):

$$\begin{aligned} & \iiint_{V(t)} \delta \nabla \mathbf{v} \cdot (\dot{\boldsymbol{\sigma}} - \nabla \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\sigma} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \boldsymbol{\sigma}) dV = \\ & = \dot{Q} \cdot \delta \dot{q}^i - \dot{q}^j \delta \dot{q}^i \iint_{S(t)} \Gamma_{ij}^k \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S(t)} \delta \mathbf{v}_t \cdot (\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \dot{\lambda}) dS \\ & \quad + \iiint_{V(t)} \delta \mathbf{v} \cdot (\dot{\mathbf{f}} + \mathbf{f} (\nabla \cdot \mathbf{v})) \end{aligned} \quad (2)$$

Так же необходимо выполнение следующих дополнительных условий:

1. Условие непроникновения: для каждой материальной точки M деформируемого тела выполняется

$$\xi^3(M) \geq 0 \quad (3)$$

Где ξ^3 – координата в криволинейной системе координат (ξ^1, ξ^2, ξ^3) на поверхности инструмента, направленная по нормали.

2. Условия гладкости решения:

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \in \mathbf{W}_2^1(V(t)) \quad (4)$$

для пространственных переменных; кроме того, $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ и $\dot{q}^l(t)$ непрерывны по времени. Здесь $\mathbf{W}_2^1(V(t))$ – представляет собой функциональное пространство Соболева для области $V(t)$.

3. Скорость произвольной материальной точки деформируемого тела на поверхности закрепления известна.

4. На поверхности прилипания выполняется:

$$\xi^i = 0 \quad (1 \leq i \leq 2) \quad (5)$$

кроме того,

$$|\mathbf{p}_t| \leq k |\mathbf{p}_n| \quad (6)$$

где $k = k(\mathbf{p}_n)$ – коэффициент трения и \mathbf{p}_n – нормальная компонента \mathbf{p} ; наконец, граничное условие:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p} \quad (7)$$

5. На поверхности проскальзывания выполняется: скорость проскальзывания противоположна касательной компоненте вектора

напряжения p ; также закон трения $|\mathbf{p}_t| = k|\mathbf{p}_n|$; кроме того, граничное условие

$$\mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) + (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n})(\nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}) = \dot{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{n} + (\mathbf{p} \cdot \mathbf{n})(\nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}) \quad (8)$$

для $t_i \leq t \leq t_f$, где t_i и t_f – начальный и конечный моменты процесса проскальзывания произвольной материальной точки деформируемого тела в зоне контакта; наконец, начальное условие $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p}$ при $t = t_i$.

6. Для любого номера $i \in L$ обобщённая координата q^i задана явно как функция времени, где L – множество номеров обобщённых координат, посредством которых задаётся движение инструментов (случай $L = \emptyset$ допускается),

7. Для любого номера $j \in I$ обобщённая сила Q_j задана явно как функция времени, где I – множество номеров обобщённых сил, посредством которых задаётся нагружение инструментов (случай $I = \emptyset$ также допускается),

8. Известна зависимость тензора $\boldsymbol{\sigma}$ от истории деформации (т.е. определяющее соотношение).

9. Начальные условия при $t = 0$:

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, 0) = \boldsymbol{\sigma}_0(\mathbf{r}), \quad (9)$$

начальные значения переменных в определяющем соотношении известны. Начальное состояние контактной пары есть состояние равновесия.

Сформулированная вариационная задача решалась численно методом конечных элементов, причём в качестве определяющего использовалось соотношение с производной Яумана (10):

$${}^j \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{d} \quad (10)$$

где:

$$D^{ijkl} = E^{ijkl} - \alpha \frac{3GS^{ij}S^{kl}}{\bar{\sigma}^2(1 + H'/(3G))}$$

Здесь:

E – тензор упругости;

$\alpha=1$ в пластическом состоянии, $\alpha=0$ – в упругом;

G – модуль сдвига;

H' – модуль упрочнения;

$\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжения;

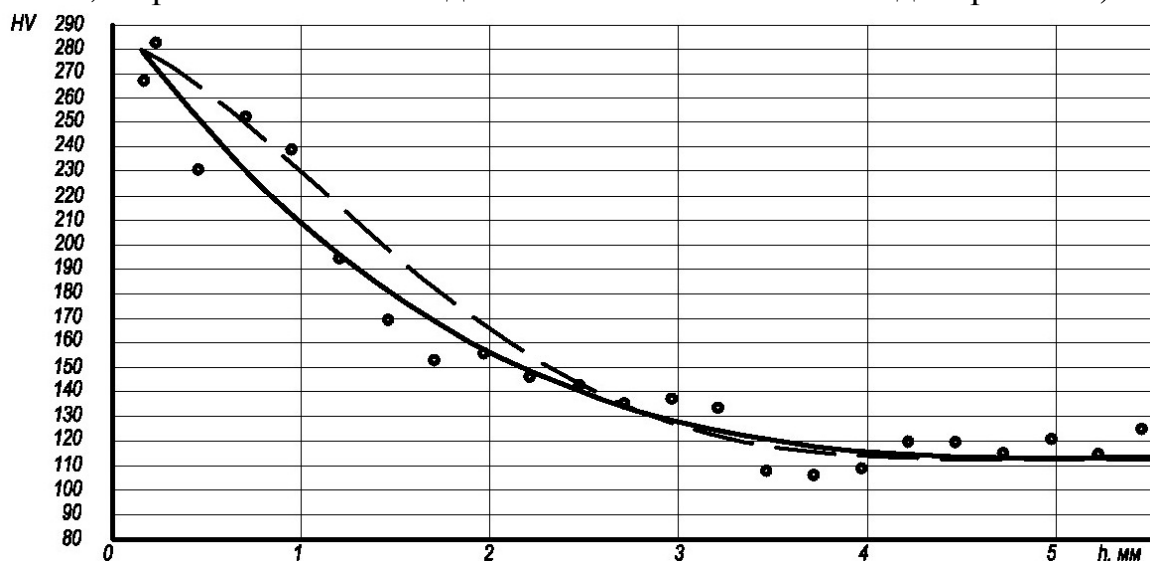
S – девиатор напряжения.

В рассматриваемой математической модели, в виду того, что при упрочнении осуществляется циклическое деформирование материала обрабатываемой заготовки, применяется изотропная теория пластичности с малой упругой деформацией.

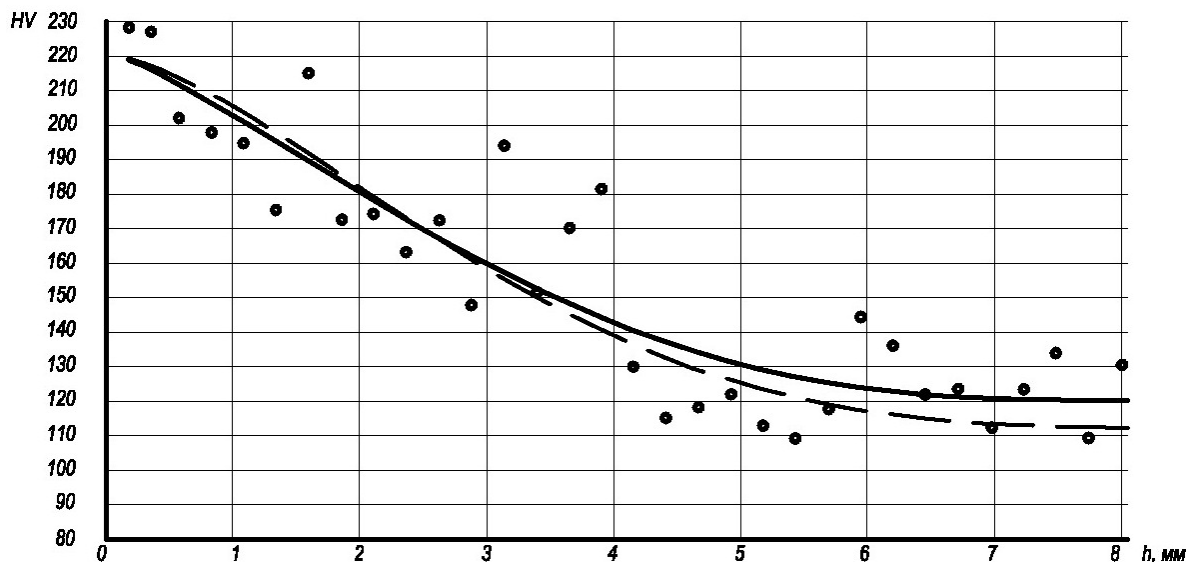
Система уравнений (1) – (10) является математической моделью рассматриваемого процесса, построенная на модификации предложенного в 1983 году О. Л. Толоконниковым, Л. А. Толоконниковым, В. Ф. Астаповым и А. А. Маркиным скоростного вариационного принципа.

Результатом математического моделирования являются графики эволюции интенсивности напряжений σ_i при различном количестве циклов обработки (от 1 до 30), варьируемом шаге продольной подачи обрабатывающего инструмента и постоянной глубине внедрения деформирующего элемента. Для сравнения данных моделирования и эксперимента приведение к одним и тем же единицам измерения осуществлялось по формуле: $\sigma_i = 0.33 \cdot HV$.

На рисунке 6 приведены сравнительные графики экспериментальных данных и математического моделирования (точками показаны данные измерений параметра микротвёрдости, сплошной линией – их аппроксимация по МНК, штриховой линией – данные математического моделирования).



а



б

Рисунок 6 – Сравнительные графики данных математического моделирования и экспериментальных исследований при $h = 0.2$ мм и:

а) $n = 30, S = 0.5$ мм; б) $n = 20, S = 1.0$ мм

Анализируя представленные картины распределения параметра микротвёрдости по сечению исследуемых образцов, можно заключить, что

рассматриваемая в данной работе математическая модель является в достаточной мере достоверной: графики данных математической модели и аппроксимации экспериментальных данных по МНК близки по форме и значениям; отклонение составляет не более 11,8 %. Это свидетельствует о том, что математическая модель даёт результаты, которые находятся в рамках теоретической погрешности, а следовательно она является адекватной.

Четвёртая глава посвящена разработке методики определения технологических параметров процесса повышения эксплуатационных характеристик деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации, а так же развитию схем упрочняющей ВШ.

При проектировании технологических процессов многоцикловой упрочняющей обработки изделий в условиях комплексного локального деформирования очага деформации применимы два варианта определения параметров обработки:

1 математическое моделирование процесса упрочняющей обработки с целью установления интересующих откликов системы на заложенные параметры обработки (рисунок 7);

2 использование предварительно подготовленных диаграмм определения параметров обработки по требуемым выходным характеристикам материала изделия (рисунок 8).

Диаграммой пользуются следующим образом:

1 выбор требуемой максимальной глубины упрочнения h , мм (ось абсцисс). Например, $h_{max} = 5$ мм;

2 отталкиваясь от заданной на предыдущем шаге глубины h , поднимаемся вертикально вверх до пересечения с графиками степеней упрочнения и выбираем максимальную степень упрочнения – параметр микротвёрдости HV_{max} (положительное направление оси ординат), одновременно с этим определяем и шаг продольной подачи S обрабатывающего инструмента. Например, примем $HV_{max} = 230$, тогда $S = 0.7$ мм соответственно;

3 от полученной точки спускаемся вертикально вниз до пересечения с графиком количества циклов обработки (отрицательное направление оси ординат), соответствующим шагу, для которого был составлен график степени упрочнения из предыдущего шага, тем самым определяя требуемое количество циклов обработки. Для рассматриваемого примера $n = 21$.

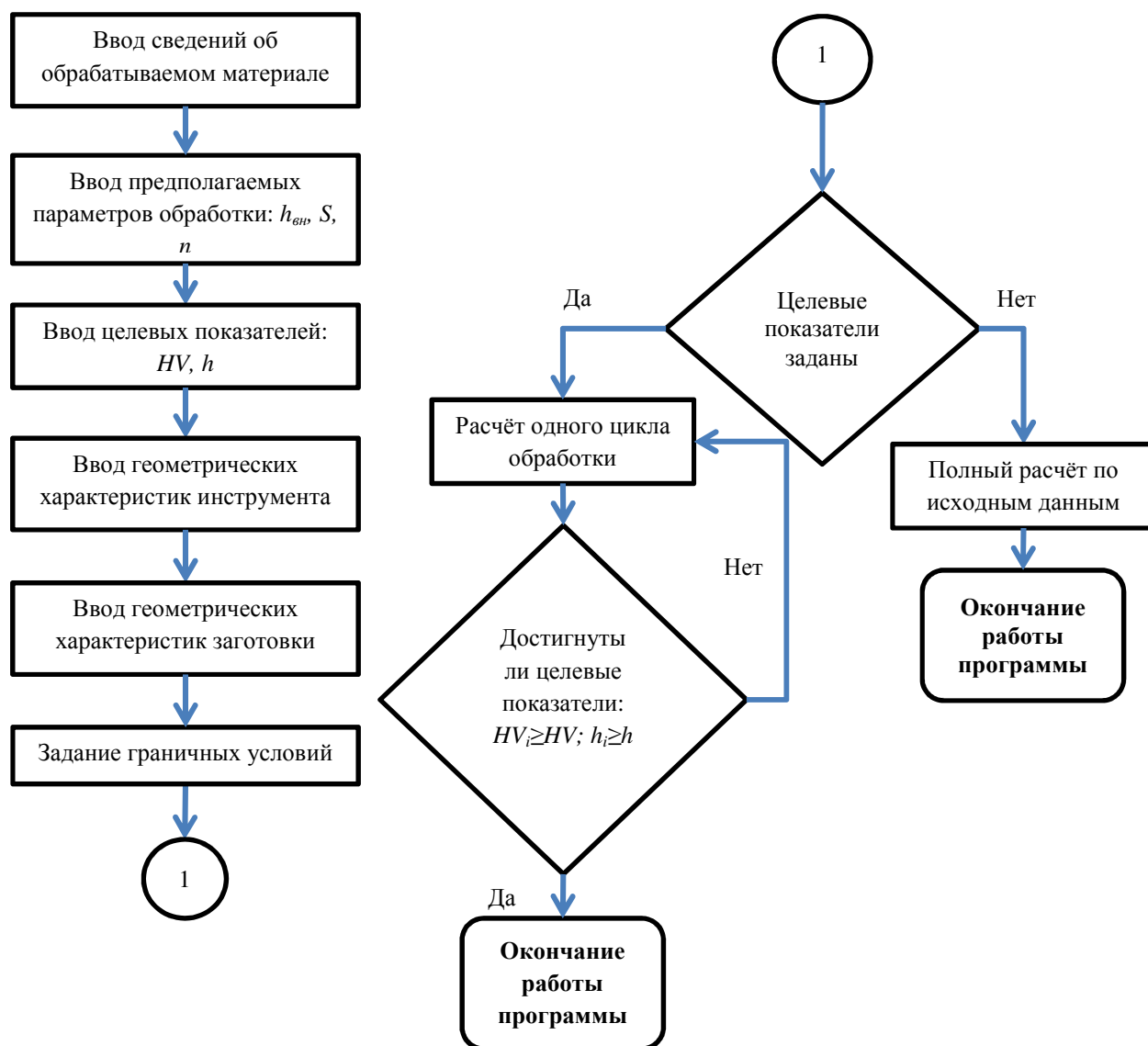


Рисунок 7 – Алгоритм определения параметров технологического процесса упрочняющей обработки математическим моделированием

Результатом выполнения описанных шагов являются следующие параметры обработки:

- глубина внедрения h , мм;
- осевая подача инструмента S , мм;
- количество циклов обработки n , необходимых для достижения требуемых показателей:

- максимальной глубины проникновения упрочнённой зоны h_{max} , мм;
- максимальной микротвёрдости поверхностного слоя HV_{max} .

Для выбора исходных геометрических параметров заготовки необходимо к требуемому номинальному диаметру изделия добавить припуск на последующую механическую обработку согласно рекомендациям общего машиностроения. Т.к. обрабатывается внутренняя поверхность полого осесимметричного изделия, то исходный диаметр необходимо уменьшить на эту величину.

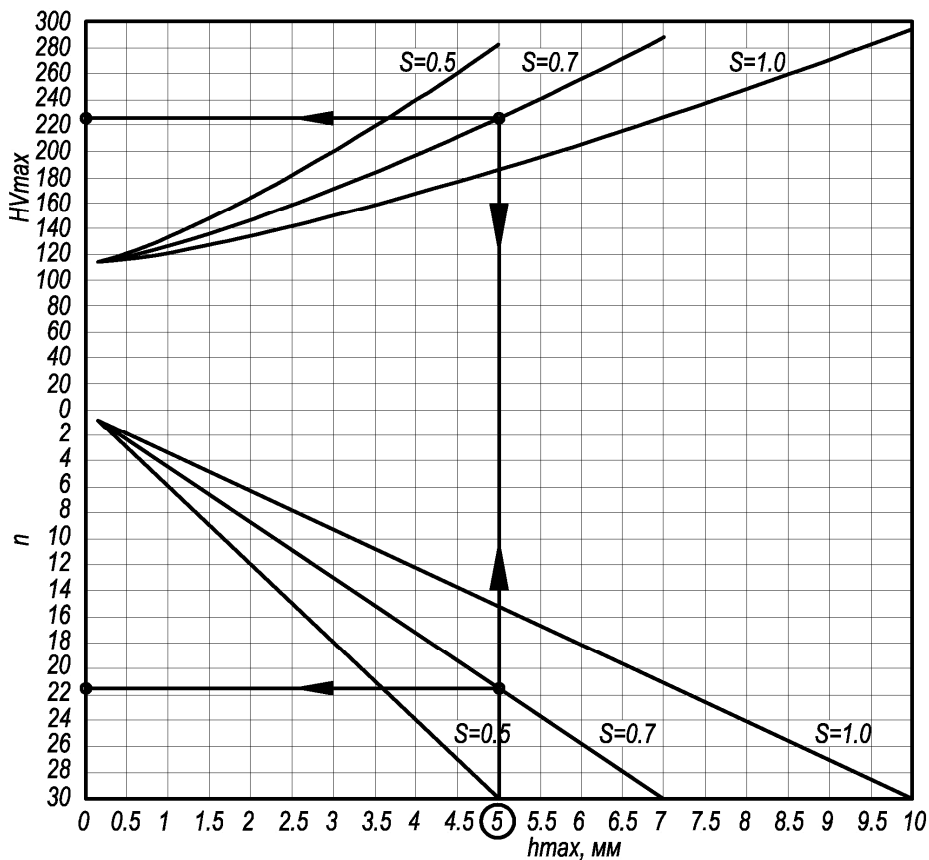


Рисунок 8 – Диаграмма определения параметров многоциклового упрочняющей обработки с применением диаграммы выходных данных

На рисунках 9 и 10 представлены схемы, расширяющие возможности рассматриваемой технологии.

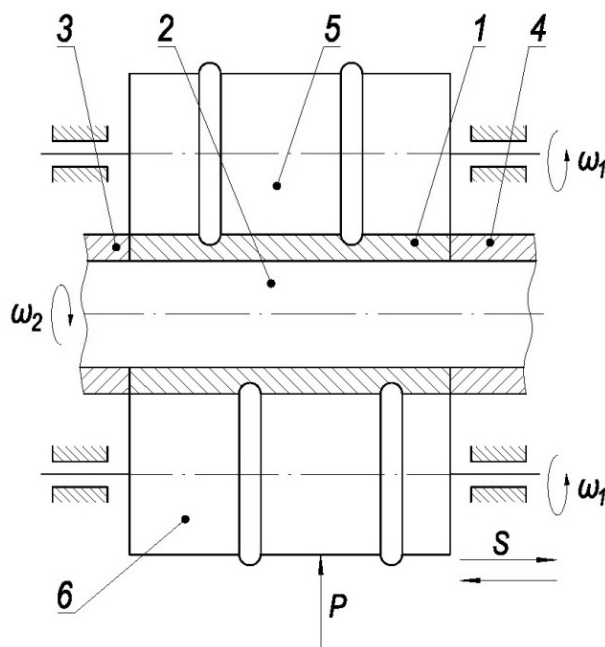


Рисунок 9 – Схема устройства для упрочнение наружных поверхностей цилиндрических осесимметричных деталей, с увеличенной производительностью

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – оправка; 3 – упор; 4 – прижим;

5 и 6 – ролики валковой матрицы

Обработка осуществляется следующим образом. Заготовку 1 помещают на оправку 2, торцы фиксируют упором 3 и прижимом 4, после

чего устанавливают в роликовую матрицу, состоящую из роликов 5 и 6, имеющих два участка большего диаметра, расположенных на расстоянии превышающем две ширины участка большего диаметра. Ролики 5 и 6 прижимают к заготовке 1 с силой P , после чего ей сообщают вращательное движение со скоростью ω_1 , а роликам – относительное осевое перемещение с постоянным шагом S . Поверхность формируют многократным возвратно-поступательным осевым перемещением и обжимом в роликовой матрице 2, после чего разводят ролики, отводят прижим и извлекают готовую втулку.

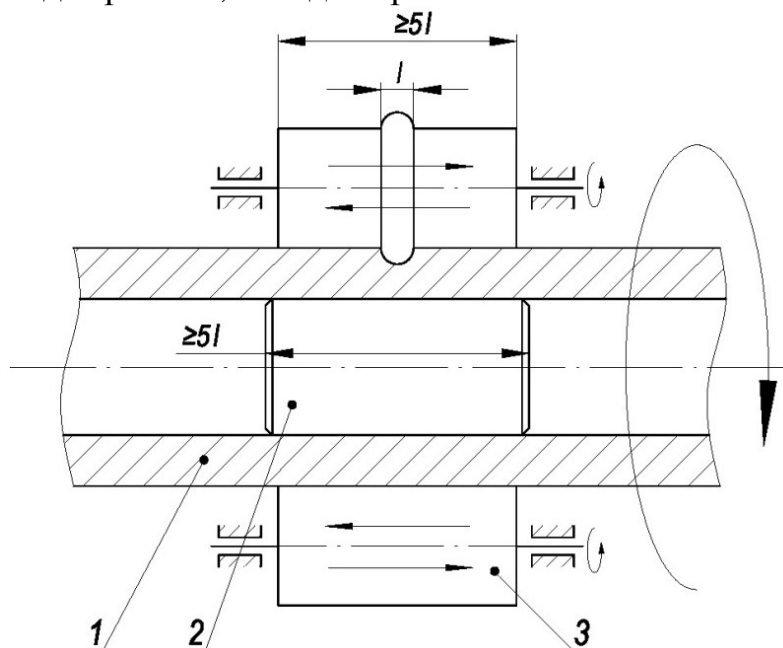


Рисунок 10 – Схема устройства для упрочнения длинных полых осесимметричных изделий

1 – заготовка; 2 – калибр; 3 – роликовая матрица

Обработка осуществляется следующим образом. Заготовку 1 в виде трубы устанавливают на калибр 2. В процессе обработки калибр 2 и роликовая матрица 3 постепенно поступательно перемещаются с определенной скоростью вдоль оси трубы, что позволяет осуществить обработку всей наружной поверхности. Наружную поверхность формируют многократным возвратно-поступательным осевым перемещением роликовой матрицы 3, имеющей ролик с участком большего диаметра и калибр 2. После обработки разводят ролики, выводят калибр и извлекают готовую упрочненную трубу.

На способы, представленные на рисунках 9 и 10 поданы заявки на выдачу патента Российской Федерации на изобретения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение **задачи**, имеющей существенное значение для теории и практики обработки металлов давлением – упрочнения деталей типа втулок созданием градиентного от внутренней поверхности упрочнения интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. На основе анализа традиционных технологий упрочняющей обработки внутренней поверхности полых осесимметричных деталей, выявлено, что перспективным направлением по повышению эксплуатационных характеристик деталей типа втулок путём формирования градиентного от внутренней поверхности упрочнения, является модификация метода валковой штамповки, заключающаяся в сочетании комплексного монотонного нагружения заготовки и периодического локального воздействия на очаг деформации.

2. Разработан новый способ упрочнения деталей типа втулок методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения очага деформации (Пат. 2462327 Российская Федерация, МПК В21Н1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Грядунов И.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». - №2010153917/02; Заявл. 27.12.2010; опубл. 27.09.2012, Бюл. №27). Разработана экспериментальная оснастка (заявка на выдачу патента на изобретение «Устройство для деформационного упрочнения внутренней поверхности полых осесимметричных заготовок» № 1491), реализующая указанный способ.

3. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования влияния технологических параметров упрочняющей обработки на упрочнение материала деталей типа втулок путём создания градиентного от внутренней поверхности упрочнения методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения.

4. Получены полые осесимметричные детали типа втулок $L = 50\text{мм}$, $\varnothing_{\text{нар.}} = 70\text{мм}$ и $\varnothing_{\text{внут.}} = 50\text{мм}$ с градиентным от внутренней поверхности распределением механических свойств по сечению изделия из заготовок, полученных наполнительным литьём малопластичного сплава БрО5Ц5С5 и установлено, что:

– с увеличением количества циклов обработки n увеличиваются глубина упрочнённой зоны h_{max} и максимальная степень упрочнения HV_{max} . Изменение шага осевой подачи S инструмента не приводит к значительному росту степени упрочнения HV_{max} ;

– с увеличением шага осевой подачи S инструмента происходит увеличение толщины упрочнённого слоя h_{max} ;

– вариации технологических параметров незначительно влияют на изменение геометрических параметров обрабатываемых изделий, величина которого находится в пределах допуска на механическую обработку;

– при достижении критического значения количества циклов обработки n начинается шелушение поверхностного слоя. С увеличением шага продольной подачи усиливается волнистость обработанной поверхности.

5. Разработана математическая модель упрочняющей обработки деталей типа втулок методом ИПД в условиях комплексного локального нагружения, позволяющая выполнять расчёт осесимметричной задачи рассматриваемого процесса. Проведены аналитические исследования разработанной математической модели. Получены графики распределения параметра микротвёрдости HV по глубине сечения исследуемых образцов в зависимости от количества циклов обработки n и шага осевой подачи S инструмента. В результате сравнения графиков, построенных на основе данных математической модели и графиков экспериментальных данных установлено, что они близки по форме и значениям, а отклонение составляет не более 11,8 %. На основе этого сделан вывод, что разработанная математическая модель является адекватной.

6. Предложены новые схемы упрочняющей обработки деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения, позволяющих получать градиентное от внутренней поверхности упрочнение, расширяющие границы применения рассматриваемого способа. На указанные способы поданы заявки на выдачу патента Российской Федерации («Устройство для упрочнения металлических трубных изделий» № 1494 и «Устройство для упрочнения металлических втулок» № 1495).

7. Разработана методика определения технологических параметров процесса упрочняющей обработки, необходимых для достижения требуемых характеристик обрабатываемого материала, облегчающая проектирование технологического процесса обработки, позволяя определить глубину внедрения деформирующего инструмента h , шаг осевой подачи инструмента S , количество циклов обработки n , позволяющих получить целевые показатели прочности готового изделия – максимальное значение параметра микротвёрдости HV_{max} и максимальную толщину упрочнённого слоя h_{max} .

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации:

1. Голенков, В.А. Классификация процессов комплексного локального деформирования / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6. – С. 85-90.

2. Голенков, В.А. Анализ видов упрочняющей обработки пластическим деформированием / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – №1. – С. 59-62.

3. Голенков, В.А. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. // *Наноинженерия.* – 2012. – №5.

4. Голенков, В.А. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2012. – №6. – С. 64-71.

5. Радченко, С.Ю. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации / Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Морев П.Г., Грядунов И.М. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2013. – №5.

Публикации в других изданиях

1. Радченко, С.Ю. Новая технология упрочнения вкладышей подшипников скольжения [Текст] / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции, под общей редакцией д.т.н., проф. А.Н. Новикова (21 - 23 мая 2013 года, ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»).* – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. – 320 с.

2. Голенков, В.А. Новое направление упрочняющей обработки металлов / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // *Высокие технологии, образование, промышленность. Т. 3: сборник статей одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 27–29 апреля 2011 года, Санкт-Петербург, Россия / под ред. А.П. Кудинова.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 426 с.

3. Голенков, В.А. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации с комплексным локальным нагружением / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // *Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzeń Europy - 2012» Volume 38. Techniczne nauki.: Przemysł (07 - 15 апреля 2012 г).* Nauka i studia - 96 str.

4. Радченко, С.Ю. Технология упрочнения полых осесимметричных деталей интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов //

Science and Education [Text] : materials of the IV international research and practice conference, Munich, Oktober 30th – 31th, 2013 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2013.

Патенты

1. Пат. 2462327 Российская Федерация, МПК В21Н1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Грядунов И.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». - №2010153917/02; Заявл. 27.12.2010; опубл. 27.09.2012, Бюл. №27.

Подписано к печати 21.11.2013 г. Формат 60x84 1/16.
Объем 1,0 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1627

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.