

На правах рукописи



Морин Владимир Валерьевич

**Повышение эффективности деформирующе-режущего
дормования статико-импульсным нагружением
и эпиламиранием инструмента**

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел, 2013

Работа выполнена на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Киричек Андрей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» Муромский институт им. В.К. Зворыкина
Соловьев Дмитрий Львович

кандидат технических наук
ОАО "Новолипецкий металлургический комбинат"
Крюков Олег Николаевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»

Защита состоится «06» декабря 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212

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

Автореферат разослан « 01 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.182.06
кандидат технических наук



Василенко Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из научных и практических задач современного машиностроения является повышение износостойкости деталей машин с внутренними нагруженными поверхностями, эксплуатирующимися в условиях знакопеременных нагрузок, скоростных и силовых режимах, действия изнашивающих и агрессивных факторов. Основной причиной потери работоспособности таких деталей является износ отверстия вследствие потери контактной выносливости.

Среди возможных методов повышения работоспособности таких деталей наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Одним из прогрессивных методов обработки отверстий ППД является дорнование. Изучению процессов ППД, его влияния на качество и эксплуатационные свойства деталей посвящены работы А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Ю.Г. Проскурякова, М.Е. Попова, А.М. Смелянского и др. Известно, что дорнование создает наклепанный слой с сжимающими остаточными напряжениями, что положительно сказывается на износостойкости детали. Однако, при увеличении глубины упрочнения ухудшаются параметры качества поверхностного слоя (шероховатость, волнистость), что требует последующей обработки для устранения недостатков.

Проблема может быть решена путем совмещения в одной технологической схеме процессов резания и деформирования. Режуще-деформирующей и деформирующе-режущей обработкой занимались: Амбросимов С.К., Блюменштейн В.Ю., Кузнецов А.М., Подураев В.Н., Посвятенко Э.К., Смелянский В.М., Ярославцев В.М. и др. Исследования Амбросимова С.К. и его учеников в области обработки труднообрабатываемых сплавов и сталей привели к разработке наиболее прогрессивного метода деформирующе-режущего протягивания (ДРП) – ДРП с косоугольным резанием. Однако, упрочненный слой становится меньше на глубину срезаемого слоя.

Увеличение глубины упрочнения достигают увеличением натяга, тем самым предъявляя повышенные требования к мощности используемого оборудования. Одним из наиболее перспективных является метод статико-импульсной обработки (СИО), предложенный А.В. Киричком, Д.Л. Соловьевым и их учениками. Отличительной особенностью метода является нагружение инструмента импульсами, генерируемыми ударной системой с промежуточным звеном, при этом энергия удара сообщается в предварительно статически напряженный очаг обработки, что позволяет более полно использовать энергию волновых процессов на осуществление процессов деформирования.

Использование статико-импульсного способа сообщения энергии инструменту позволяет существенно повысить натяг, что позволяет увеличить глубину упрочнения, но ведет к повышению контактных напряжений и увеличению сил трения между заготовкой и инструментом. Перспективным методом изменения условий трения является применение эпиламирования – процесса нанесе-

ния на поверхность инструмента нанопленок фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ФТОР-ПАВ) из растворов эпиламов. Изучением процесса эпиламирования, влияния тонкопленочного покрытия на работоспособность и износостойкость инструментов занимались Ганцевич И.Б., Гарбар И.И., Звягина Е.А., Киричек А.В., Напреев И.С., Потеха В.Л., Рогачев А.В., Рябинин Н.А., Сапгир Е.В., Селеменев М.Ф., Тимофеева Л.В., Харченко М.И. и др. Основным положительный эффект от нанесения нанопленки достигается за счет удержания СОТС на поверхности инструмента.

Следовательно, перспективна и актуальна разработка новой технологии обработки деталей с отверстиями, сочетающей деформирующе-режущее дорнование, в том числе с косоугольным резанием, со статико-импульсным нагружением и эпиламированием инструмента.

Цель работы: технологическое обеспечение повышения эффективности деформирующе-режущего дорнования с косоугольным резанием статико-импульсным нагружением и эпиламированием инструмента, выявление рациональных режимов обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

Задачи исследования:

1. Установить характер влияния статико-импульсного нагружения и эпиламирования инструмента на процесс деформирующе-режущего дорнования с косоугольным резанием (ДРД с КР).
2. Экспериментально оценить влияние параметров статико-импульсного нагружения (СИН) на процесс ДРД с КР.
3. Разработать и изготовить оснастку и инструмент для проведения экспериментальных исследований.
4. Произвести экспериментальные и теоретические исследования влияния эпиламирования на процесс обработки отверстий ДРД с КР с СИН.
5. Определить рациональную область режимов обработки внутренней цилиндрической поверхности ДРД с КР с СИН эпиламированного инструмента.
6. Разработать технологические рекомендации.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика объемного моделирования процесса обработки отверстий ДРД с КР с СИН эпиламированным инструментом на основе МКЭ в программном комплексе DEFORM-3D.
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований: а) влияние технологических режимов СНО, геометрических параметров инструмента, на качество обработанной поверхности; б) влияния нанопленок эпилама на процесс обработки и качество обработанной поверхности.
3. Теоретические зависимости влияния технологических факторов на качество обрабатываемой поверхности в зависимости от геометрии инструмента.

4. Технологические рекомендации по реализации процесса обработки методом ДРД с КР с СИН эпиламинированным инструментом.

Научная новизна работы:

1. Установлена высокая эффективность разработанной технологии обработки отверстий по схеме деформирующе-режущего дорнования с косоугольным резанием и статико-импульсным нагружением эпиламинированного инструмента, которая позволила получить увеличенную до 3 мм глубину упрочнения h_m , повысить микротвердость упрочненного поверхностного слоя H_μ до 8700 МПа, обеспечить шероховатость обработанной поверхности Ra – до 1,6 мкм без потери точности обработки.

2. Выявлены закономерности влияния технологических (натяга, статической составляющей силы, частоты и энергии импульса) и конструкторско-технологических (угла заборного конуса, ширины деформирующей ленточки, угла наклона режущей кромки относительно оси) параметров разработанного технологического процесса на параметры качества обработанной поверхности (шероховатость, глубину упрочнения, микротвердость).

Практическая значимость работы заключается в создании новой технологии обработки отверстий, а также разработанных технологических рекомендаций и выявлении области рациональных значений технологических и конструкторско-технологических параметров деформирующе-режущего дорнования с косоугольным резанием и статико-импульсным нагружением эпиламинированного инструмента, обеспечивающим высокие показатели качества обработанного поверхностного слоя при заданной точности обработки.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на региональных, всесоюзных, республиканских, международных и интернет конференциях, совещаниях и семинарах: Конференция молодых ученых ЦФО РФ «Актуальные направления научных исследований» (Калуга, 2009), на XXXVII молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения», МАТИ, (Москва, 2011), «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства» IV молодежная научно-техническая конференция «Поликарповские чтения» (Орел, 2011), «Современные материалы и технологии» международный Российско-Китайский симпозиум (Хабаровск, 2011), на внутривузовских научных конференциях профессорско-преподавательского состава (Орел, 2009-2012 г.г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 7 патентов РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа представлена на 161 странице основного текста, содержит 67 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 93 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой в работе научно-технической задачи, определены цели и задачи исследований, приводятся данные о публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ деталей и методов повышения качества обработки отверстий. Установлено, что эффективным методом обработки отверстий, позволяющем получить высокую точность и упрочнение поверхностного слоя, является деформирующе-режущее протягивание с косоугольным резанием (ДРП с КР) (рис. 1), разработанная С.К. Амбросимовым и его учениками.

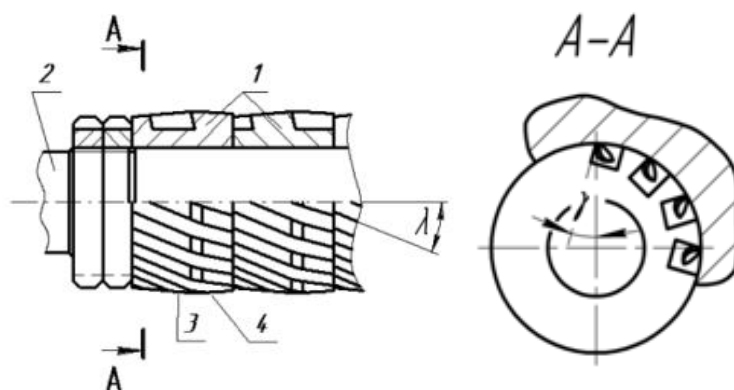


Рис. 1 Деформирующе-режущая протяжка с косоугольным резанием

На рисунке 1 представлено расположение деформирующе-режущих элементов 1 смонтированных на оправке 2. Ширина выполненных на рабочей поверхности канавок 3 равна ширине образованных выступов 4. Канавки выполнены под углом γ к оси протяжки в плоскости поперечного сечения, и под углом λ к оси протяжки в горизонтальной плоскости.

Высокая степень стойкости режущих зубьев позволяет производить обработку с большими натягами для повышения микротвердости и глубины упрочнения. Передовым методом в области глубокого упрочнения методами ППД является СИО. Отличительной особенностью данного метода является нагружение инструмента импульсами, генерируемыми ударной системой, при этом энергия удара сообщается в предварительно статически напряженный очаг обработки, что позволяет более полно использовать энергию волновых процессов на осуществление процессов деформирования.

Повышение натяга ведет к повышению адгезионной составляющей процесса обработки. Эффективным решением проблемы, является уменьшение адгезионного взаимодействия обеспечением СОТС в зоне обработки. Наиболее перспективным методом разделения обрабатываемой поверхности детали и рабочей поверхности инструмента является граничный слой смазки, которая удерживается в энергетических карманах эпиламированной поверхности инструмента.

Эпиламирование – процесс нанесения на поверхность инструмента нанопленок фторсодержащих поверхностно-активных веществ (ФТОР-ПАВ) из

растворов эпиламов. Основной эффект достигается за счет изменения краевого угла смачивания и удержания СОТС на поверхности инструмента.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, проведение тарировки и методика планирования эксперимента.

Тарировку оборудования производили по методике, изложенной в работах Киричека А.В., Соловьева Д.Л., Барина С.В., Силантьева С.А. За основные варьируемые параметры подлежащие тарировке принимали статическую силу поджатия, энергию и частоту ударов.

Для изучения закономерностей влияния параметров процесса на показатели качества обработанной поверхности реализовывалась матрица планирования вида 2^k (где k – количество технологических факторов в эксперименте) с количеством опытов $N = 2^k$.

По результатам экспериментальных данных строились уравнения регрессии: $Y = C + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_k * x_k$; (1)

где: Y – выходной параметр эксперимента; x_1, x_2, x_k – технологические факторы эксперимента; C, a_1, a_2, a_k – коэффициенты уравнения.

Статистическая обработка всех выходных параметров экспериментов производилась в системе STATISTICA.

В третьей главе рассмотрена задача проектирования модели, процесса обработки ДРД с КР с СИН эпиламированным инструментом.

Многочисленность входных факторов усложняет проведение экспериментальных исследований. Для выявления наиболее значимых факторов и уменьшения количества экспериментов принято решение построения модели, используя методы конечных элементов (МКЭ) в САД системе. В результате анализа выбран программный пакет DEFORM-3D, позволяющий моделировать деформирующие и режущие процессы обработки.

В качестве плана теоретического эксперимента выбрана реплика дробного факторного эксперимента (2^{8-3}). В результате анализа предыдущих исследований выбраны следующие уровни:

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни факторов	Обозначения	x_1 $i, \text{мм}$	x_2 $A, \text{Дж}$	x_3 $f, \text{Гц}$	x_4 $P_{cm}, \text{кН}$	x_5 $\lambda, ^\circ$	x_6 $\alpha, ^\circ$	x_7 $b, \text{мм}$	x_8 D/d
Основной	0	0,3	150	8	15	35	4,5	1,5	1,6
Инт. вар-я	Δx_i	0,15	50	2	5	10	2	0,5	0,4
Верхний	+1	0,45	200	10	20	45	6,5	2	2
Нижний	-1	0,15	100	6	10	25	2,5	1	1,2

Построена пластическая модель деформации материала заготовки. Создание трехмерных моделей заготовок и инструментов производили в системе трехмерного моделирования SolidWorks 2006. Экспорт файлов в препроцессор DEFORM-3D производили в формате для стереолитографии (*.stl). При моделировании инструмент принимали абсолютно жестким, заготовку -

пластичной. Генерацию сетки задавали с использованием окон плотности. Так, в области деформирования сетка имела грани 0,1 мм, остальной объем 1 мм. Процесс резания обуславливали коэффициентом разрушения связей, для стали - 0,65. Материал заготовки задавали из библиотеки программы. Поступательное движение инструмента в вертикальной плоскости было задано как функция силы от времени, которая была получена в работе.

На рисунке 2 представлены графики влияния технологических факторов на глубину упрочнения (h_m) поверхностного слоя детали. На рисунке 3 а) представлен график зависимости глубины упрочнения от натяга с изменением угла заборного конуса α деформирующе-режущего элемента (ДРЭ). Из графика видно, что наиболее оптимальный угол заборного конуса $4,5^\circ$. Изменения параметров глубины упрочнения, при изменении угла в большую или меньшую сторону, незначительны. Следовательно, как фактором эксперимента, влияющим на качество поверхностного слоя, изменением угла заборного конуса можно пренебречь. Аналогично, графики зависимости глубины упрочнения от натяга с изменением угла наклона режущей кромки относительно оси λ ДРЭ (рис. 3 б) и с изменением ширины деформируемой ленточки b (рис. 3 в) показали незначительные отклонения глубины упрочнения. Оптимальным значением ширины деформируемой ленточки b и угла наклона режущей кромки относительно оси λ ДРЭ приняты 1,5 мм и 35° соответственно.

В результате обработки данных построены математические модели характеризующие процесс обработки отверстия ДРД с СИН, для микротвердости поверхностного слоя ($H\mu$) - (Y_1) и глубины упрочнения (h_m) - (Y_2), в зависимости от технологических и конструкторско-технологических факторов:

$$Y_1 = 5628 + 2039 * X_1 + 1237 * X_2 - 336 * X_3 - 139 * X_2 X_3 - 134,5 * X_1 X_3 + 116 * X_4 + 71 * X_1 X_2 X_4 - 67 * X_1 X_2 X_3; \quad (2)$$

$$Y_2 = 2,245 + 0,86 * X_1 + 0,34 * X_2 + 0,09 * X_1 X_5 + 0,06 * X_2 * (X_5 + X_4) - 0,056 * X_7 + 0,054 * (X_5 + X_1 X_2) + 0,053 * X_2 * (X_3 X_4 + X_1 X_5); \quad (3)$$

Из анализа уравнений следует:

1) на микротвердость влияние натяга, энергии и частоты ударов соотносится как 6/3/1 соответственно, т.е. влияние натяга в шесть раз превосходит влияние частоты и в 2 раза энергии удара. Влияние статической силы тоже есть, но оно слабее влияния частоты ударов в 3 раза, в 12 раз энергии удара, в 20 раз натяга;

2) на глубину упрочненного слоя основное влияние оказывает натяг и энергия ударов, при этом влияние натяга в 2 раза превосходит энергии удара. Отмечено влияние угла наклона режущей кромки относительно оси заготовки и ширины деформирующей ленточки, влияние которых примерно в 7 раз меньше энергии удара

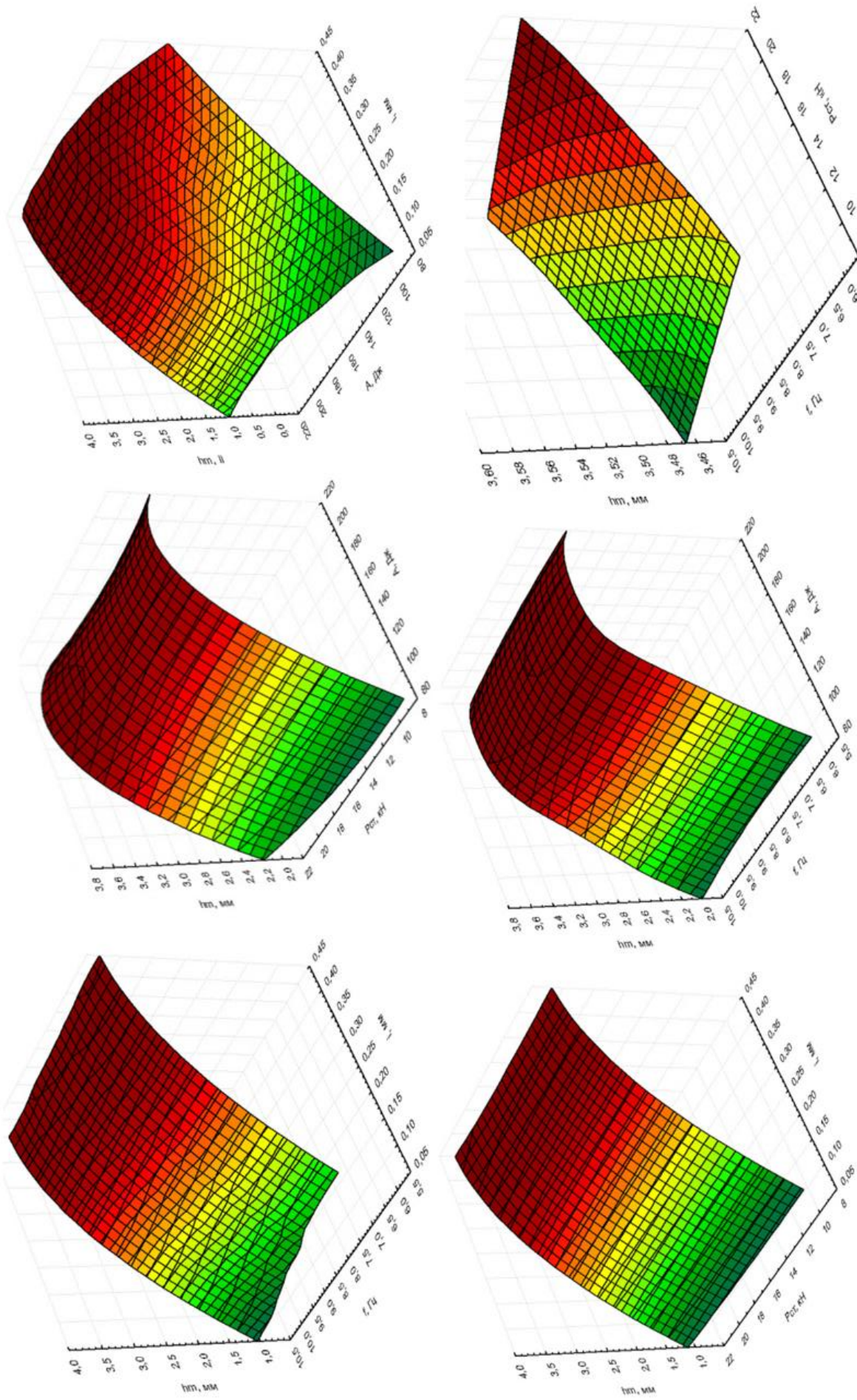


Рис. 2 Влияние технологических параметров на глубину упрочнения (h_m , мм)

где: A – энергия ударов, Дж; f – частота ударов, Гц; i – натяг, мм; $P_{ст}$ – статическая сила поджатия, кН

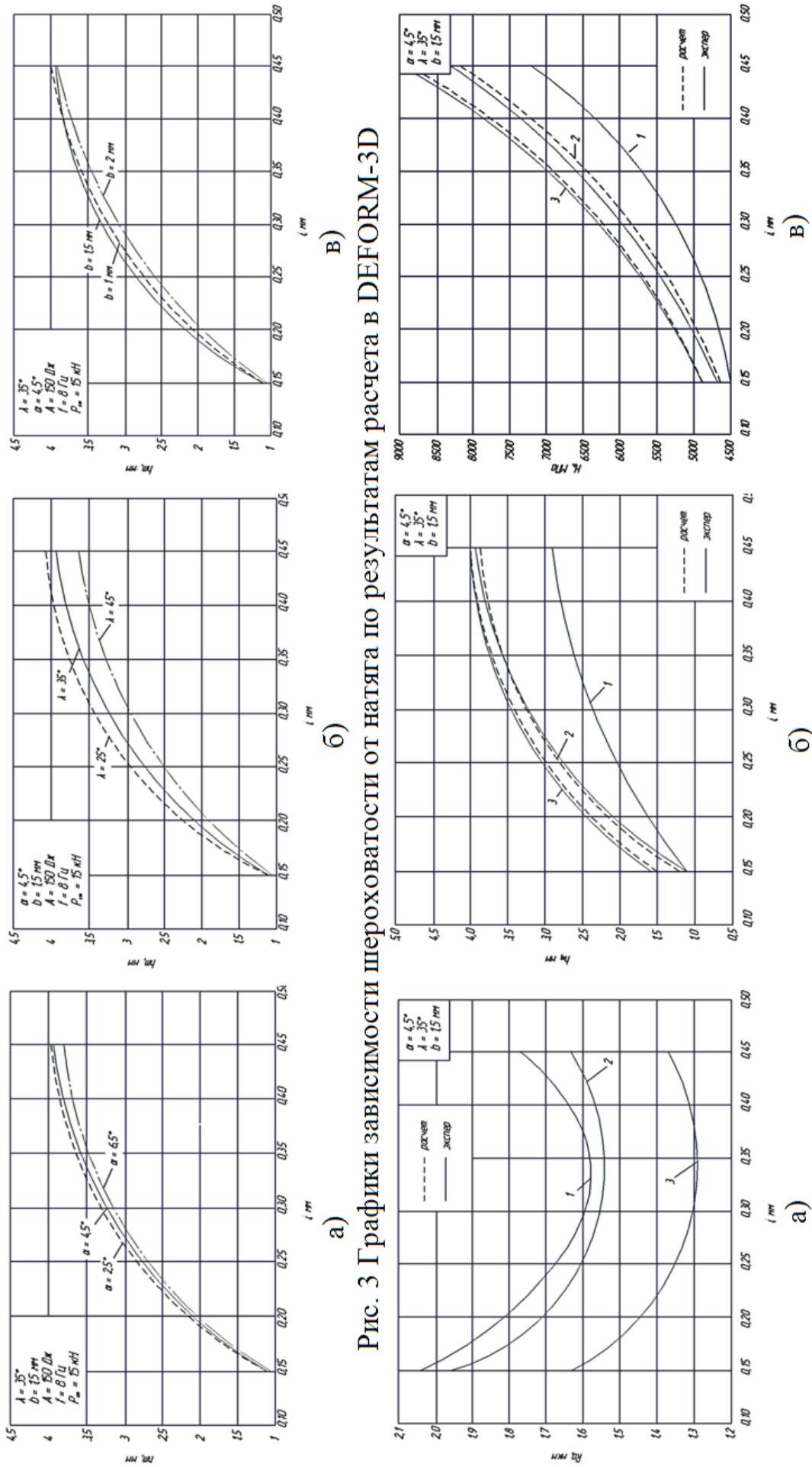


Рис. 3 Графики зависимости шероховатости от натяга по результатам расчета в DEFORM-3D

Рис. 4 Графики зависимостей параметров обработанной поверхности от натяга (l)

где: 1 – ДРП (по данным Крюкова О.Н.); 2 – ДРД с СИН ($A=150 \text{ Дж}$; $f=8 \text{ Гц}$; $P_{ст}=15 \text{ кН}$); 3 – ДРД с СИН эпиламированным инструментом ($A=150 \text{ Дж}$; $f=8 \text{ Гц}$; $P_{ст}=15 \text{ кН}$)

В четвертой главе представлено описание проведения эксперимента, обработка данных экспериментальных исследований, технологические рекомендации.

Выбор уровней и интервалов варьирования технологических факторов: энергии (A) и частоты (f) ударов, статической силы поджатия (P_{cm}), производился с учетом полученных результатов в DEFORM-3D и рекомендациями Соловьева Д.Л., Силантьева С.А., Полякова А.В. по обработке отверстий статико-импульсным дорнованием (СИД). Натяг (i) выбирали из интервалов рекомендованных предыдущими исследователями: Амбросимовым С.К., Крюковым О.Н.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни факторов	Обозначения	x_1 i , мм	x_2 A , Дж	x_3 f , Гц	x_4 P_{cm} , кН
Основной	0	0,3	150	8	15
Инт. вар-я	Δx_i	0,15	50	2	5
Верхний	+1	0,45	200	10	20
Нижний	-1	0,15	100	6	10

В качестве плана эксперимента выбрана полуреплика (2^{4-1}) от полного факторного эксперимента 2^4 . Реплика задана генерирующим соотношением $x_4 = x_1x_2x_3$.

По результатам экспериментальных данных построены графики зависимостей: рис. 4 а) шероховатости (Ra) от натяга (i), рис. 4 б) глубины упрочнения (h_m) от натяга (i), 4 в) микротвердости поверхностного слоя (H_μ) от натяга (i). В результате анализа данных получены уравнения регрессии:

$$y_1 = 2,0875 + 0,0350x_1 - 0,0502x_2 + 0,0175x_1x_2 - 0,0150x_1x_3 + 0,0325x_4; \quad (4)$$

$$y_2 = 1,19 + 0,1738x_1 + 0,1213x_2 - 0,0938x_1x_2 + 0,0138x_4; \quad (5)$$

$$y_3 = 1,18 + 0,1663x_1 - 0,0588x_2 + 0,0288x_3 + 0,0862x_1x_2 - 0,0163x_1x_3 + 0,1088x_2x_3 - 0,0762x_4 \quad (6)$$

где: y_1 - шероховатость (Ra), y_2 - микротвердость поверхностного слоя (H_μ), y_3 - глубина упрочнения (h_m).

Из рисунка 4 видно, что расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 20%, что подтверждает адекватность модели процесса обработки, построенной в DEFORM-3D.

Анализ показал, что при изменении натяга от 0,15 до 0,3 мм шероховатость уменьшается, а при изменении от 0,35 до 0,45 повышается, что является решающим фактором выбора (рис. 4 а). Область рационального выбора натяга: $i = 0,25-0,40$ мм. Также заметно существенное снижение шероховатости при обработке эпиламинированным инструментом.

Повышение натяга способствует увеличению глубины упрочнения (рис. 4 б). Однако, увеличение натяга, приводит к повышению шероховатости. При необходимости глубокого упрочнения рационально рассматривать вариант с последующей обработкой шлифованием.

В зависимости от требуемых параметров поверхностного слоя обработанной поверхности предложены способы: отделочное ДРД с КР с СИН эпиламинированным инструментом (ОДРД с КР с СИН ЭИ), позволяет получить низкую шероховатость до 1,3 мкм и глубину упрочнения до 2 мм; отделочно-упрочняющее ДРД с КР с СИН ЭИ (ОУДРД с КР с СИН ЭИ), позволяет получить $Ra = 1,8-2,3$ мкм и h_m до 2,5 мм; упрочняющее ДРД с КР с СИН ЭИ (УДРД с КР с СИН ЭИ), позволяет получить $Ra = 2,5-3,2$ мкм и h_m до 3 мм

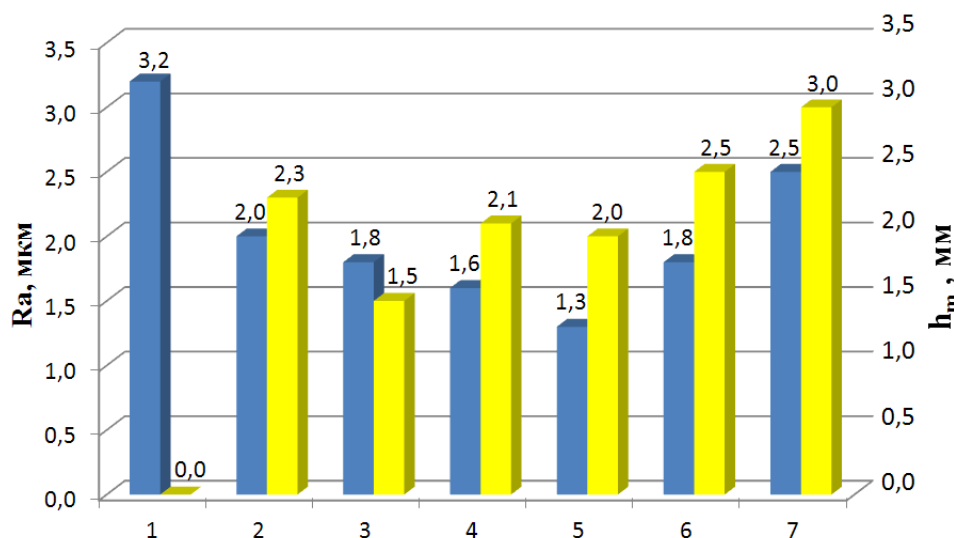


Рис. 5 Шероховатость и глубина упрочнения внутренней цилиндрической поверхности, обработанной различными технологическими способами.

1 – до обработки, 2 – СИД (по результатам Полякова А.В.), 3 – ДРД с КР (по результатам Крюкова О.Н.), 4 – ДРД с КР с СИН, 5 – ОДРД с КР с СИН ЭИ, 6 – ОУДРД с КР с СИН ЭИ, 7 – УДРД с КР с СИН ЭИ.

Таблица 3 – Технологические рекомендации для обработки отверстий с радиальной жесткостью $D/d \geq 1,3$ и длиной обрабатываемой поверхности до 50 мм из стали 45.

Метод обработки	Ra , мкм	H_{μ} , МПа	h_m , мм	i , мм	A , Дж	f , Гц	P_{cm} , кН
ОДРД с КР с СИН ЭИ	1,3	6500	2,1	0,25	120	12	10
	1,6	6800	2,3	0,30	125		12
ОУДРД с КР с СИН ЭИ	1,8	7300	2,5	0,30	135	10	12
	2,3	7900	2,7	0,35	140		15
УДРД с КР с СИН ЭИ	2,5	8300	2,9	0,35	150	8	17
	3,2	8700	3,1	0,40	155		20

Производственная апробация обработки внутренней цилиндрической поверхности детали «Гидроцилиндр» деформирующе-режущим дорнованием с статико-импульсным нагружением эпиламированным инструментом выполнена на предприятии ЗАО «Техоснастка» (г. Орел). Ожидаемый экономический эффект, получаемый за счет повышения производительности и качества обработки, при мелкосерийном производстве, составит более 140 тыс. руб./год.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложен комплекс обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность деформирующе-режущего дорнования статико-импульсным нагружением и эпиламированием инструмента.

2. В результате выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что наиболее значимыми параметрами при обработке деформирующе-режущим дорнованием с статико-импульсным нагружением являются натяг, энергия и частота ударов.

- при изменении натяга от 0,15 до 0,3 мм шероховатость уменьшается, а при изменении от 0,35 до 0,45 повышается, что является решающим фактором выбора. Рекомендуемый диапазон от 0,25 до 0,35 мм, позволяет получить глубину упрочнения до 3-х мм, микротвердость до 7500 МПа и шероховатость Ra до 1,6 мкм без потери точности.

- повышение энергии ударов способствует увеличению микротвердости и глубины упрочнения, однако выявлен экстремальный характер зависимости шероховатости от энергии ударов. Анализ показал, что значительное увеличение микротвердости и глубины упрочнения происходит в диапазоне изменения энергии ударов 100-160 Дж. Дальнейшее увеличение энергии ударов не дает значимых положительных результатов, но ведет к ухудшению параметров шероховатости. Рекомендуемый диапазон $A = 150-160$ Дж позволяет получить $Ra=1,6$ мкм, глубину упрочнения до 3-х мм, микротвердость до 7500 МПа.

- увеличение частоты ударов сопровождается уменьшением глубины упрочнения и микротвердости. Рекомендуемый рациональный диапазон частоты ударов составляет от 8 до 10 Гц, что позволяет получить глубину упрочнения до 3-х мм, микротвердость до 7500 МПа и шероховатость Ra до 1,6 мкм без потери точности.

- нанесение нанопленок эпилама на поверхность инструмента способствует снижению шероховатости на 30% в сравнении с методом обработки деформирующе-режущим протягиванием неэпиламированным инструментом.

3. В результате обработки данных теоретических расчетов в программном пакете Deform-3D получены математические модели описывающие процесс обработки отверстия деформирующе-режущими элементами с статико-

импульсным нагружением инструмента. В результате анализа модели установлено, что основное влияние на параметры качества поверхностного слоя оказывает натяг и энергетические параметры обработки. Установлено:

- влияние натяга, энергии и частоты ударов на микротвердость соотносится как 6/3/1 соответственно, т.е. влияние натяга в 2 раза больше влияния энергии удара и в шесть раз частоты ударов. Влияние статической силы поджатия тоже есть, но оно меньше влияния частоты ударов в 3 раза, в 12 раз энергии удара, в 20 раз натяга;

- на глубину упрочненного слоя основное влияние оказывает натяг и энергия ударов, при этом влияние натяга в 2 раза сильнее влияния энергии удара. Кроме энергетических и силовых параметров, отмечено влияние угла наклона режущей кромки относительно оси заготовки и ширины деформирующей ленточки, влияние которых примерно в 7 раз меньше влияния энергии удара.

4. Спроектированы и изготовлены технологическая оснастка и инструмент для проведения экспериментальных исследований.

5. Разработана технология деформирующе-режущего дорнования с статико-импульсным нагружением эпиламированного инструмента. Установлено: увеличение глубины упрочнения на 45%, - микротвердости на 30% за счет использования импульсной составляющей нагрузки в пятне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности; снижение шероховатости на 30% за счет удержания СОТС на поверхности инструмента нанопленками эпилама в сравнении с методом ДРП.

6. Разработаны технологические рекомендации по назначению режимов обработки в зависимости от требований к качеству поверхностного слоя. Рекомендуемые режимы для обработки отверстий деформирующе-режущим дорнованием с статико-импульсным нагружением эпиламированным инструментом при:

- упрочняющей обработке: $i = 0,35-0,40$ мм; $A = 150-155$ Дж; $f = 6-8$ Гц; $P_{ст} = 17-20$ кН позволяют получить Ra 2,5-3,2 мкм, глубину упрочнения до 3 мм, микротвердость до 8700 МПа;

- отделочно-упрочняющей обработке: $i = 0,30-0,35$ мм; $A = 135-140$ Дж; $f = 8-10$ Гц; $P_{ст} = 12-15$ кН позволяют получить Ra 1,8-2,3 мкм, глубину упрочнения 2,5 мм, микротвердость 7300-7900 МПа;

- отделочной обработке: $i = 0,25-0,30$ мм; $A = 120-125$ Дж; $f = 12-15$ Гц; $P_{ст} = 10-12$ кН позволяют получить Ra 1,3-1,6 мкм, глубину упрочнения 2 мм, микротвердость 6500-6800 МПа;

7. Произведена производственная апробация на ЗАО «Техоснастка». Ожидаемый экономический эффект от внедрения метода обработки отверстий ДРД с КР с СИН эпиламированным инструментом при мелкосерийном производстве составляет более 140 тыс. руб./год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. **Морин В.В.** Перспективы повышения эффективности деформирующе-режущего протягивания статико-импульсным нагружением и эпиламированием инструмента [Текст] / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов [и др.] // Известия ОрелГТУ. Машиностроение – 2009. – №3-2/275. – С. 3-7.

2. **Морин В.В.** Волновое нагружение деформирующе-режущих протяжек [Текст] / А.В. Киричек, В.В. Морин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение – 2010. – №4-2/282. – С. 21-26.

3. **Морин В.В.** Статико-импульсная обработка отверстий [Текст] / А.В. Киричек, М.Ф. Селеменев [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3 (286). – С. 90-94.

4. **Морин В.В.** Методы моделирования статико-импульсной обработки внутренних цилиндрических поверхностей [Текст] / Морин В.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №3-3 (293). – С. 3-8.

5. **Морин В.В.** Установка для упрочнения волной деформации [Текст] / А.В. Киричек, С.В. Андреев [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №3-3 (293). – С. 37-43.

Публикации в журналах и сборниках конференций:

6. **Морин В.В.** Перспективы повышения износостойкости протяжек путем нанесения на режущую поверхность растворов эпиламов [Текст] / А.В. Киричек, М.Ф. Селеменев [и др.] // «Актуальные направления научных исследований»: Материалы конференции молодых ученых ЦФО РФ, 25 – 27 ноября 2009г., – Калуга – 2009. – С. 292-295.

7. **Морин В.В.** Возможность использования статико-импульсной обработки при деформирующе-режущем протягивании [Текст] / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов [и др.] // Сборник трудов Региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, Орел-Ливны, 26 февраля 2010. / Под общей редакцией Ю.С. Степанова. Орел: ОрелГТУ – 2010. – С. 72-73.

8. **Морин В.В.** Возможность повышения работоспособности деформирующе-режущих протяжек путем эпиламирования инструмента [Текст] / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов [и др.] // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении. Воронеж. ВГТУ – 2010. – С. 111-112.

9. **Морин В.В.** Дорнование отверстий без предварительной обработки [Текст] / А.В. Киричек, С.К. Амбросимов [и др.] // Сб. тр. 3-й международ. науч.- техн. конф. г. Брянск, 19-20 мая 2011 г. / Под общ. ред. А.Г. Сулова. – Брянск: Десяточка. – 2011. – С. 124-125.

10. **Морин В.В.** Актуальность эпиламирования инструмента при обработке ППД [Текст] / А.В. Киричек, В.В. Морин // XXXVII Гагаринские чте-

ния. Международная молодежная научная конференция. Научные труды в 8 томах. Т1. М.:МАТИ. – 2011. – С. 78-79.

11. **Morin V.V.** Deforming-cutting pulling with tool static-pulse loading [Text] / A.V. Kirichek, V.V. Morin // Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Symposium. Proceedings. – Khabarovsk: Pacific National University – 2011. – P. 233-236.

12. **Патент РФ №2457097** Способ статико-импульсного упругого дорнования / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Самойлов Н.Н., Афанасьев Б.И., Гаврилин А.М., Морин В.В. – 2012 г.

13. **Патент РФ № 2464152** Устройство для статико-импульсного упругого дорнования / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Гаврилин А.М., Афанасьев Б.И., Самойлов Н.Н. – 2012.

14. **Патент РФ № 2474486** Способ пластического деформирования и калибрования внутренних цилиндрических поверхностей деталей деформирующе-режущим инструментом / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Афанасьев Б.И., Самойлов Н.Н. – 2013.

15. **Патент РФ № 2462340** Способ статико-импульсного дорнования пружинящим дорном / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Поляков А.В., Афанасьев Б.И., Селеменев М.Ф. – 2012.

16. **Патент РФ № 2462339** Устройство для статико-импульсного дорнования пружинящим дорном / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Поляков А.В., Афанасьев Б.И., Селеменев М.Ф. – 2012.

17. **Патент РФ № 2460627** Способ деформирующе-режущего дорнования со статико-импульсным нагружением / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Поляков А.В., Афанасьев Б.И., Селеменев М.Ф. – 2012.

18. **Патент РФ № 2460626** Устройство для статико-импульсного деформирующе-режущего дорнования / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Морин В.В., Поляков А.В., Афанасьев Б.И., Селеменев М.Ф. – 2012.

Подписано в печать «22» октября 2013 г. Заказ № 1521

Объем 1,0 усл. п. л. Формат 60x84-1/16. Тираж 100 экз.

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