

На правах рукописи



ВОЛОБУЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ РЕЖИМНОЙ ОБЛАСТИ
СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОСРЕДСТВОМ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА**

Специальность 05.02.07 - «Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Орел 2012

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс" (г. Орел).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Киричек Андрей Викторович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Албагачиев Али Юсупович
зав. кафедрой «Технология машиностроения и
технологическая информатика» ФГБОУ ВПО
«Московский государственный университет
приборостроения и информатики»

к.т.н., доцент Корнев Владислав Николаевич
кафедра «Надежность и ремонт машин» ФГБОУ
ВПО «Орловский государственный аграрный
университет»

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет»

Защита состоится "21" декабря 2012 г. в 13⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.182.06 при Госуниверситете - УНПК по
адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Госуниверситета - УНПК

Автореферат разослан "19" ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.182.06
кандидат технических наук, доцент



Ю.В. Василенко

Актуальность проблемы.

Вследствие непрерывного ужесточения требований к качеству, ресурсу, надежности и техническим характеристикам изделий, проблема их технологического обеспечения особенно актуальна для современного машиностроения. В производстве проблема решается за счет применения упрочняющих технологий, обеспечивающих необходимое качество поверхностного слоя, влияние которого на интенсивность износа и разрушения деталей машин проявляется на всех уровнях строения материала.

Одним из наиболее прогрессивных видов отделочно-упрочняющей обработки в машиностроении является поверхностное пластическое деформирование (ППД), которое позволяет наряду с существенным снижением шероховатости и волнистости создать наклепанный поверхностный слой со сжимающими технологическими напряжениями и высокой микротвердостью, серьезно увеличить ресурс детали, что убедительно доказано исследованиями А.Ю. Албагачиева, А.П. Бабичева, М.А. Балтер, В.Ф. Безъязычного, В.Ю. Блюменштейна, В.М. Браславского, М.С. Дрозда, А.В. Киричека, Ю.Р. Копылова, В.А. Лебедева, М.М. Матлина, А.А. Михайлова, Л.Г. Одинцова, Н.В. Олейника, Д.Д. Папшева, В.В. Петросова, Попова М.Е., Э.В. Рыжова, В.И. Серебрякова, А.Г. Сулова, Ю.И. Сидякина, В.М. Смелянского, Д.Л. Соловьева, Г.В. Степанова, М.А. Тамаркина, В.П. Федорова, Л.А. Хворостухина, П.А. Чепы, Д.Л. Юдина и др. Однако, технологические возможности большинства известных видов ППД в управлении параметрами качества поверхностного слоя ограничены.

Статико-импульсная обработка (СИО), разработанная А.В. Киричком, Д.Л. Соловьевым, А.Н. Афониним, С.А. Силантьевым, С.В. Баринным, - является одним из новых способов ППД. Вследствие рационального использования волновых процессов СИО отличается высокой энергетической эффективностью. В процессе СИО энергия удара сообщается в очаг деформации (ОД) через промежуточное звено – волновод. Особенностью СИО является комбинированное статическое и динамическое нагружение материала в пятне контакта инструмента и заготовки. Основное деформирующее воздействие производится за счет динамической составляющей нагрузки – пролонгированного ударного импульса, длительность которого многократно превышает длительность импульса, генерируемого в примитивных ударных системах без промежуточного звена. Предварительное статическое поджатие инструмента к обрабатываемой поверхности создает условия для наиболее полной реализации энергии импульса на процесс пластического деформирования материала.

От других видов ППД СИО отличает большое количество управляемых технологических и конструкторско-технологических параметров. Ввод даже одного нового управляемого технологического параметра существенно расширяет технологические возможности способа обработки. Вследствие расширенного набора независимых управляемых факторов СИО имеет уникальные технологические возможности варьирования значениями параметров качества поверхностного слоя в широком диапазоне. Это

позволяет успешно встраивать СИО в технологические процессы в качестве упрочняющего или отделочно-упрочняющего способа ППД, использовать СИО для обработки самых разных деталей. Однако, наличие большого количества независимых параметров сопровождается сложностями многофакторного управления процессом, а при решении конкретных задач вызывает серьезные затруднения поиска рациональной режимной области.

Цель работы: определение рациональной режимной области статико-импульсной обработки посредством моделирования процесса и создания системы обоснованного выбора параметров обработки в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя.

Задачи исследования:

1. Провести анализ известных взаимосвязей между показателями качества поверхностного слоя, технологическими и конструкторско-технологическими параметрами статико-импульсной обработки.

2. Сформировать комплекс взаимосвязанных моделей, поэтапно описывающих процесс СИО с момента генерации волны деформации до формирования параметров качества поверхностного слоя.

3. Ввести необходимые уточнения в известные модели, учитывая сложный характер сопротивления упругопластически деформируемого обрабатываемого материала внедрению инструмента.

4. Выполнить экспериментальную оценку адекватности уточненной модели сравнением с результатами расчета по уточненной модели формы ударных импульсов и параметров деформированного слоя.

5. Разработать обобщенный алгоритм решения прямой задачи определения показателей качества упрочненного поверхностного слоя в зависимости от параметров СИО.

6. Разработать обобщенный алгоритм решения обратной задачи определения параметров СИО по заданным значениям показателей качества упрочненного поверхностного слоя.

7. Разработать программный продукт, позволяющий автоматизировать процедуру расчета при решении прямой и обратной задачи.

8. С помощью разработанного программного продукта проанализировать процесс статико-импульсной обработки с целью установления новых взаимосвязей, выявления наиболее значимых параметров СИО и уточнения рационального диапазона их варьирования при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя детали.

9. Дать технологические рекомендации по быстрому определению рациональной режимной области, позволяющие обеспечить эффективность статико-импульсной обработки при формировании заданных параметров качества упрочненного поверхностного слоя.

Научная новизна.

1. Разработан информационно-аналитический комплекс, отражающий взаимосвязи между технологическими и конструкторско-технологическими параметрами СИО с одной стороны, и показателями качества обрабатываемого поверхностного слоя с другой стороны, позволяющий

определять по результатам решения как прямой, так и обратной задачи рациональную режимную область статико-импульсной обработки.

2. Уточнена модель формы импульса (динамической составляющей силы деформирования) в очаге деформации с учетом изменяющихся условий деформирования материала за время действия ударного импульса, характеризующихся функцией коэффициента сопротивления обрабатываемого материала внедрению инструмента.

3. Установлена зависимость эпюры микротвердости поверхностного слоя от коэффициента перекрытия единичных пластических отпечатков, справедливая для разных материалов, что обеспечивает высокую универсальность информационно-аналитического комплекса.

4. Выявлены новые взаимосвязи между параметрами статико-импульсной обработки и показателями качества поверхностного слоя.

Практическая ценность работы заключается в разработке программного продукта, предназначенного для автоматизации вычислений прямой и обратной задачи СИО, уточнению и разработке технологических рекомендаций по рациональной режимной области СИО.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном симпозиуме «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы», КнАГТУ (г. Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.); международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении», БГИТА (г. Брянск, 2010 г.), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава (г. Орел, 2008-2012 г.г.).

Диссертация выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 09-01-99005 «Исследование закономерностей формирования гетерогенных механических свойств материала волной деформации и его долговечности в условиях локальных циклических контактных нагрузок»; гос. контракта № 7.505.2011 «Высокоэффективные технологии комбинированного упрочнения и формообразования поверхностным пластическим деформированием».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ из них 1 монография, 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента и 1 свидетельство о регистрации программного продукта.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и библиографического списка. Работа изложена на 144 страницах, содержит 7 таблиц, 36 рисунков, и список литературы из 117 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований направленных на создание комплекса взаимосвязанных моделей, поэтапно описывающих процесс статико-импульсной обработки, от формирования волны деформации до создания параметров качества поверхностного слоя,

определение рациональной режимной области СИО в зависимости от требуемых показателей качества упрочненного поверхностного слоя.

В первой главе проведен анализ основных показателей качества поверхностного слоя, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей машин. Выявлено, что наиболее значимыми являются микротвердость, величина остаточных напряжений, параметры шероховатости поверхности. Одним из наиболее эффективных способов управления параметрами качества поверхностного слоя является обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). Одним из наиболее универсальных способов ППД, позволяющим регулировать параметры качества поверхностного слоя в широком диапазоне, является статико-импульсная обработка (СИО), схема которой приведена на рис. 1.

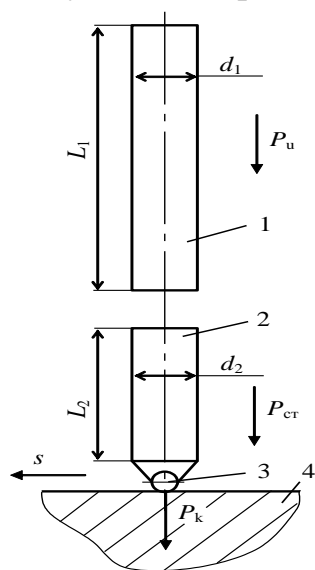


Рис. 1. Схема нагружения поверхности при статико-импульсной обработке:

1 – боек, 2 – волновод, 3 – инструмент,
4 – обрабатываемая поверхность;

P_u – динамическая (импульсная) нагрузка,

$P_{ст}$ – статическая нагрузка,

P_k – контактная сила в очаге деформации,

s – подача;

L_1, L_2 – длина бойка и волновода, соответственно;

d_1, d_2 – диаметр поперечного сечения соответственно бойка и волновода.

Выбор эффективных режимов СИО в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя является сложной и многовариантной задачей, для решения которой необходима разработка программного продукта с дружественным и понятным неспециалисту интерфейсом, в основу которого положены сквозные алгоритмы решения прямой и обратной задачи, а также комплекс взаимосвязанных моделей.

Модели, полученные ранее А.В. Киричком, Д.Л. Соловьевым, А.Н. Афониним, С.А. Силантьевым, С.В. Бариновым, описывают отдельные этапы СИО, не всегда согласованы между собой. Их применение в производственных условиях требует наличия квалифицированного специалиста, хорошо разбирающегося в вопросах волнового деформационного упрочнения и способного принимать правильные решения при переходе от одной модели к другой.

Кроме того, известные модели СИО нуждаются в уточнении, в первую очередь в связи с фактическим изменением сопротивления обрабатываемого материала внедрению деформирующего инструмента за время действия импульса, что ранее не учитывалось. Коэффициент сопротивления внедрению, являющийся интегральной характеристикой свойств материала детали и условий контакта инструмента и обрабатываемой поверхности,

принимался константой. Фактически, в связи с упрочнением материала и увеличением площади пятна контакта инструмента и обрабатываемой детали, необходимо задавать функциональную зависимость от времени увеличивающегося коэффициента сопротивления внедрению.

Следовательно, достижение поставленной цели возможно только путем создания сквозной модели СИО, глубокого исследования взаимосвязей параметров процесса с показателями качества поверхностного слоя.

Во второй главе описано оборудование для проведения экспериментальных исследований и представлена методика проведения эксперимента.

Для оценки влияния параметров СИО на параметры ударных импульсов, оценки пластической деформации обрабатываемого поверхностного слоя детали использовался экспериментальный стенд, который моделирует процесс СИО при однократном воздействии инструмента на упрочняемую поверхность. Регистрация ударных импульсов осуществлялась пьезоэлектрическими датчиками, сигналы с которых фиксировались четырехканальным осциллографом-приставкой АСК 3107-L, подсоединенным к персональному компьютеру.

Измерение диаметров пластических отпечатков проводилось на оптическом микроскопе ММИ 2, точность измерений которого составляет $\pm 0,5$ мкм. Для оценки микротвердости использовался ультразвуковой твердомер МЕТ-У1.

Третья глава посвящена систематизации и уточнению существующих моделей, описывающих: определение динамической составляющей силы деформирования (формы ударного импульса) в пятне контакта инструмента и заготовки в произвольный момент времени; определение энергии ударного импульса; определение пластической деформации и глубины упрочнения; определение глубины и степени упрочнения в зависимости от перекрытия пластических отпечатков.

Известные модели преобразованы с позиций единой системы обозначений параметров, выстроены во взаимосвязанную последовательность, поэтапно описывающую процесс СИО с момента генерации волны деформации до формирования параметров качества поверхностного слоя.

Математическая модель определения динамической составляющей силы деформирования в пятне контакта инструмента и заготовки в произвольный момент времени имеет следующие граничные условия: волновод жестко упирается в упрочняемую поверхность, а боек после удара удерживается с ним в контакте в течение времени, многократно превышающем период ударного импульса; размеры инструмента малы по сравнению с длиной волны деформации, подходящей к упрочняемой поверхности и не вносят существенных изменений в параметры волны при прохождении ее по инструменту.

Форма ударного импульса будет определяться скоростью удара, геометрическими и акустическими свойствами ударной системы. Вследствие

несомненных энергетических преимуществ практически используется отношение площадей поперечного сечения бойка и волновода $r = F_1/F_2 \geq 1$. Для статико-импульсной обработки установлено, что соотношение длин бойка и волновода $n = L_1/L_2 > 1$. Следовательно, для $r \geq 1$ и $n > 1$, при $m \leq n$, $m = ta_2/(2L_2)$, где m – количество импульсов, воздействующих на обрабатываемую поверхность за время t , то есть для первого периода (головной части импульса) – от 0 до T общая формула для определения контактной силы будет выглядеть следующим образом:

$$P_{kj} = (1 + \psi) \left[\sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^{m-j} \left(P_{uj} \Delta^{m-j-i} (\psi R_0^*)^i \right) \right] + (1 + \psi)^2 R_0^* \Delta \times \left[\sum_{j=3}^m \sum_{i=0}^{m-j} \left(P_{uj-2} \Delta^{m-j-i} (\psi R_0^*)^i \right) (m-j-i+1)(i+1) \right], \quad (1)$$

для второго периода действия волн деформации (хвостовой части импульса) при $n < m \leq 2n$, то есть от T до $2T$, общая формула для определения контактной силы будет выглядеть

$$P_{kj} = (1 + \psi) \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{m-j} \Omega \right] + R_0^* \left[\sum_{j=n+1}^m \sum_{i=0}^{m-j} \Omega \right] + \psi q^* \xi q \sum_{j=n+2}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega \sum_{i=0}^{m-j} (\psi R_0^*)^i \right] + (1 + \psi) \Delta q^* \xi q \sum_{j=n+3}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (i+1) \right] + (1 + \psi)^2 \Delta^2 R_0^* q^* \xi q \sum_{j=n+4}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \right] + (1 + \psi)^2 \Delta R_0^* \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \right] + R_0^* \left[\sum_{j=n+1}^m \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \right] + \psi q^* \xi q \sum_{j=n+2}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \sum_{i=0}^{m-j} (\psi R_0^*)^i \right] + (1 + \psi) \Delta q^* \xi q \sum_{j=n+3}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (i+1) \right] + (1 + \psi)^2 \Delta^2 R_0^* q^* \xi q \times \sum_{j=n+4}^m \left[\sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \sum_{i=0}^{m-j} \Omega (m-j-i+1)(i+1) \right],$$

$$\psi = 1 - 2\Delta; \quad \Delta = e^{-ba_2t}; \quad b = \frac{k}{E_2 F_2},$$

$$P_u = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} v; \quad C_{1,2} = \rho_{1,2} F_{1,2} a_{1,2}; \quad a_{1,2} = \sqrt{\frac{E_{1,2}}{\rho_{1,2}}},$$

$$R_0 = \frac{1-r'}{1+r'}; \quad q = \frac{2}{r'+1}; \quad R_0^* = \frac{r'-1}{r'+1}; \quad q^* = \frac{2r'}{r'+1},$$

$$\Omega = P_{u,j} \Delta^{m-j-i} (\psi R_0^*)^i.$$

где v - скорость удара, м/с; $\psi, \psi+1$ - коэффициент отражения и прохождения ударного импульса при взаимодействии волны деформации в контактном сечении волновода с упругопластической границей; E_2 - модуль упругости материала волновода, Па; t - координата времени, с; k - коэффициент, характеризующий сопротивление обрабатываемого материала внедрению инструмента, Н/м; q^* - коэффициент прохождения обратной волны; R_0^* - коэффициент отражения обратной волны; C_1, C_2 - ударная жесткость соответственно бойка и волновода, кг/с; a_1, a_2 - скорость распространения ударной волны соответственно в бойке и волноводе, м/с; E_1, E_2 - модуль упругости материала соответственно бойка и волновода, МПа; ρ_1, ρ_2 - плотность материала соответственно бойка и волновода, кг/м³; F_1, F_2 - площадь поперечного сечения соответственно бойка и волновода, м²; q - коэффициент прохождения прямой волны деформации; R_0 - коэффициент отражения прямой волны деформации; $\xi = -1$ - коэффициент прохождения волны деформации от свободной границы бойка.

Большое влияние на процесс взаимодействия силовой импульсной системы с нагружаемой средой оказывает характеристика сопротивления среды внедрению в нее инструмента, которая определяется физико-механическими свойствами нагружаемого материала, а также кривизной инструмента и обрабатываемой поверхности и выражается через коэффициент сопротивления внедрению:

$$k = 2\pi R_{\text{пр}} \text{НД} n_{\text{д}} \phi^{-1}, \quad (3)$$

$$n_{\text{д}} = 0,5 \left(1 - 137 \frac{v}{\text{НД}} + \sqrt{1 + 2250 \frac{v}{\text{НД}}} \right), \quad (4)$$

где $R_{\text{пр}}$ - приведенный радиус кривизны соударяющихся тел, мм; НД - пластическая твердость обрабатываемого металла, $n_{\text{д}}$ - динамический коэффициент пластической твердости, $\phi = 0,92 \dots 0,97$ - коэффициент пластичности.

Установлено, что в большей степени на k влияют приведенный радиус кривизны сопряженных поверхностей инструмента и заготовки и пластическая твердость. Однако, по мере внедрения инструмента в материал значение НД_0 будет постоянно увеличиваться, соответственно, будет увеличиваться коэффициент сопротивления внедрению. Ранее в расчетах по (1) и (2) формы ударного импульса этим увеличением пренебрегали.

Для задания зависимости $k(t)$ (где t - координата времени действия ударного импульса в интервале $0 \dots T$, T - длительность ударного импульса) были приняты следующие допущения. Приведенная кривизна инструмента и упрочняемой поверхности не изменяется в процессе нагружения. Начальному значению $k_0 = k(0)$ соответствует исходная твердость материала

$HД_0$. Конечному значению $k_{\max} = k(T)$ соответствует максимально достижимая при деформационном упрочнении данного материала твердость $HД_{\max}$. Для некоторых марок сталей значения $HД_{\max}$ приведены в табл. 1.

1. Характеристики упрочняемых материалов

Марка материала	Исходная твердость, HV, МПа	Максимально достижимая степень упрочнения, ΔHV_{\max} , %
Сталь 45	1600-2350	80
9ХС	3400-3800	20
110Г13Л	1800-2200	150
30ХГСА	2400-2800	35
ШХ15	3600-4000	25

Зависимость $k(t)$ в общем случае неизвестна, теоретически может иметь различный характер. Предложено записать ее следующим образом:

$$k(t) = k_0 + \gamma k_{\max} t^{\beta}, \quad (5)$$

где k_{\max} – максимальное значение коэффициента сопротивления внедрению, достигаемое при внедрении инструмента;

$$k_{\max} = 2\pi R_{\text{пр}} HД_0 n_d \phi^{-1} \left(1 + \frac{\Delta HV_{\max}}{100} \right), \quad (6)$$

k_0 – начальное значение коэффициента сопротивления внедрению, определяемое по исходной твердости материала, β – показатель степени, зависящий от модели поведения материала и определяющий характер $k(t)$, γ – показатель степени, зависящий от характера $k(t)$ и максимально достигаемой степени упрочнения для данного материала, например для стали 45 ($HV = 2100$ МПа) и линейной зависимости, т.е. $\beta = 1$, $\gamma = 2400$, для степенных зависимостей: $\beta = 1/2$, $\gamma = 32,5$; $\beta = 1/3$, $\gamma = 7,8$; $\beta = 2$, $\gamma = 1,28 \cdot 10^7$; $\beta = 3$, $\gamma = 6,9 \cdot 10^{10}$ (рис. 2).

После подстановки значений $k=const$ и $k(t)$ в (1) и (2) выполнено сравнение импульсов (рис. 3). Проведены расчеты по модели определения энергии ударного импульса и модели определения пластической деформации и глубины упрочнения. Установлено, что введение функциональной зависимости для коэффициента сопротивления внедрению позволяет уточнить значение по амплитуде головной и хвостовой части ударного импульса до 23%. Значение энергии, передаваемой нагружаемому материалу, уточняется до 37%.

Проведены экспериментальные исследования процесса СИО, получены осциллограммы ударных импульсов и единичные пластические отпечатки на образцах.

Важным критерием адекватности расчетных импульсов экспериментальным являлась амплитуда, определяющая изменение контактной силы в очаге деформации. Выполнено сравнение максимальной амплитуды рассчитанных ударных импульсов и зафиксированных на осциллограммах (рис. 4).

Установлено, что расхождение амплитуд головной части расчетных и экспериментальных импульсов, не превышает 5%. Это важно, поскольку пластическая деформация осуществляется в большей степени за счет головной части импульса, а вклад хвостовой части составляет около 16%.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями характерных размеров пластических отпечатков и глубины упрочнения при $k=const$ не превышает 23%, а при $k(t)$ – 15% (рис. 5).

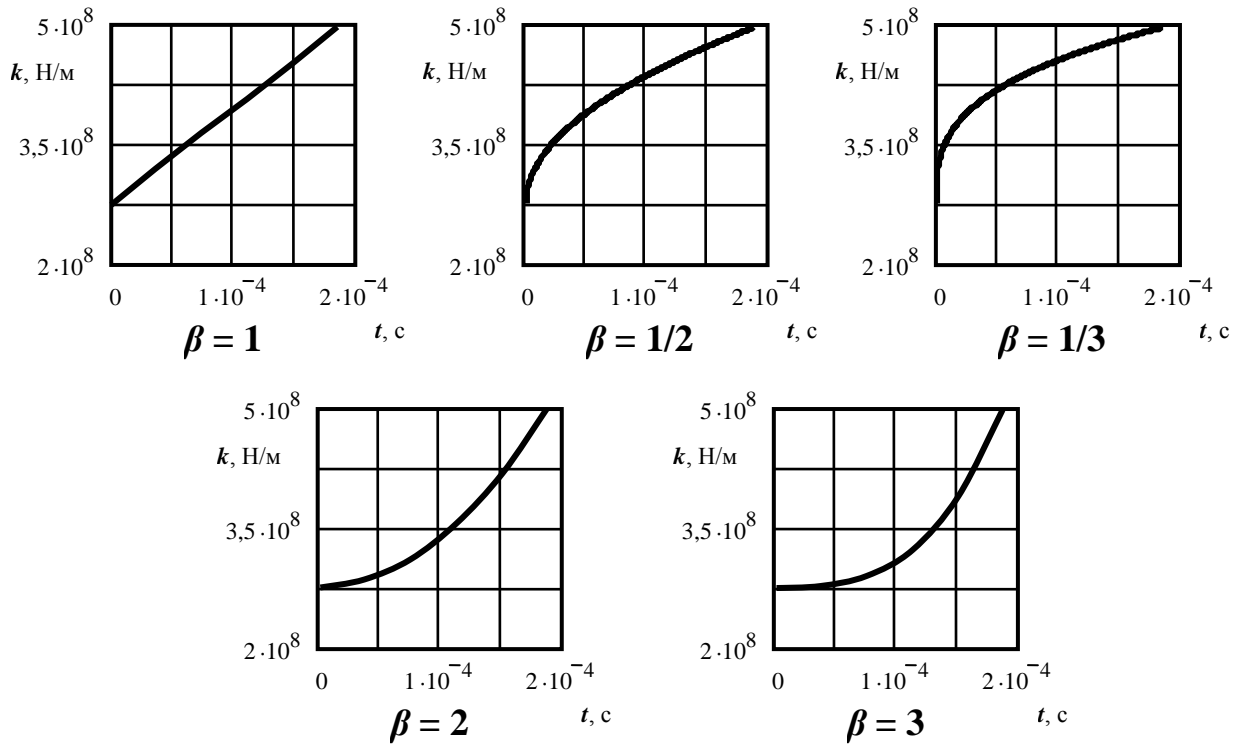


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления внедрению от времени действия ударного импульса ($d_1 = 0,048$ м, $L_1 = 0,485$ м, $n = 2$, $r' = 2$, $R_{11} = 80$ мм, $R_{21} = 5$ мм, $R_{12} = \infty$, $R_{22} = \infty$)

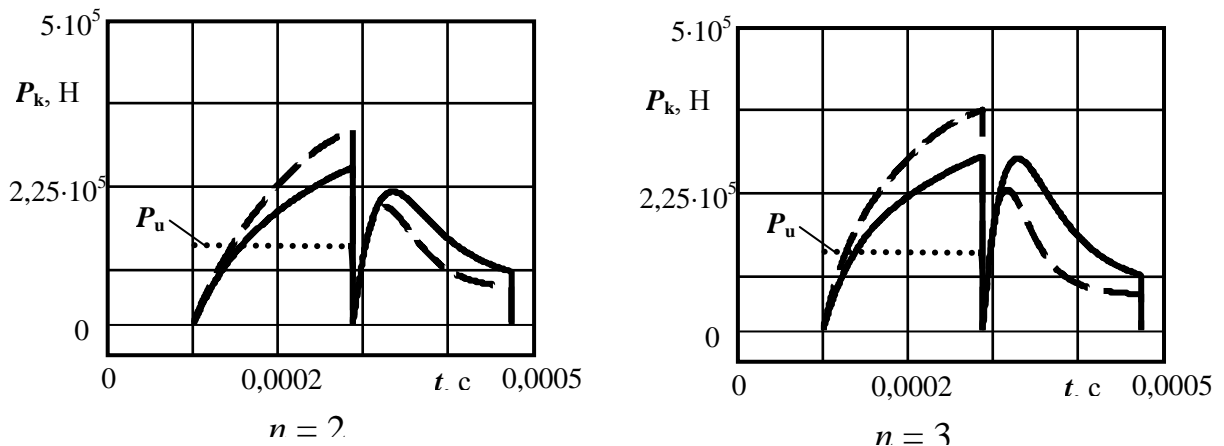


Рис. 3. Форма импульса в зависимости от коэффициента сопротивления внедрению заданного постоянной величиной k (—) и функцией, зависящей от времени $k(t)$ (— —) ($\beta = 1$, $d_1 = 0,048$ м, $L_1 = 0,485$ м, $r' = 2$, $R_{11} = 80$ мм, $R_{21} = 5$ мм, $R_{12} = \infty$, $R_{22} = \infty$, $A = 100$ Дж, твердость нагружаемой поверхности HV = 2100 МПа)

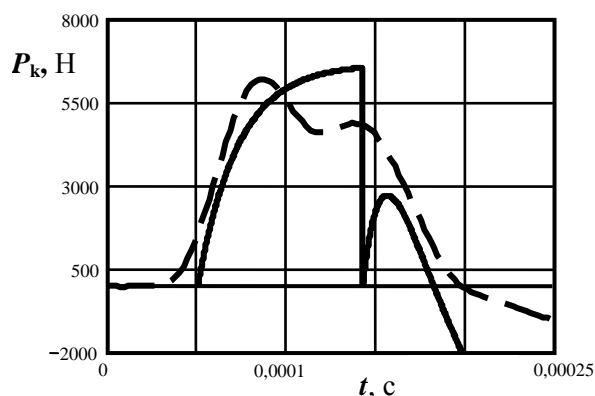


Рис. 4. Форма ударного импульса, получаемая в результате расчета (————) и экспериментально (— — —) ($\beta = 1$, $d_1 = 0,022$ м, $L_1 = 0,24$ м, $n = 3$, $r = 1$, $R_{11} = 22$ мм, $R_{21} = 22$ мм, $R_{12} = \infty$, $R_{22} = \infty$, твердость нагружаемой поверхности $HV = 5300$ МПа)

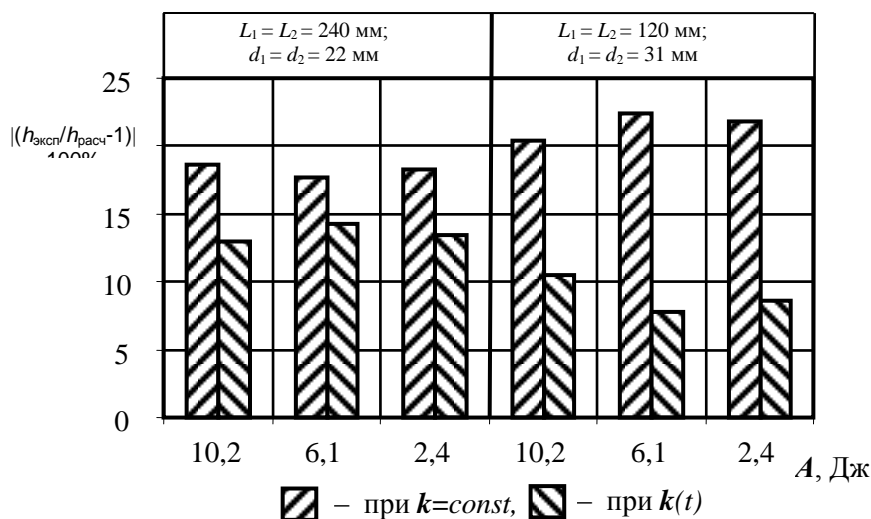


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений глубины упрочнения h для различных энергий ударных импульсов A

Проведены теоретические исследования влияния вида зависимости $k(t)$ на форму ударных импульсов, в результате которых установлено, что в зависимости от характера кривой $k(t)$ амплитуда головной части не меняется, а амплитуда хвостовой отличается относительно прямолинейной $k(t)$ не более чем на 22%. Следовательно, при отсутствии достоверной информации о характере зависимости $k(t)$ допустимо считать ее прямолинейной.

Упрочненный поверхностный слой при СИО формируется в результате последовательного перекрытия пластических отпечатков. Поэтому, при моделировании процесса СИО, необходимо учитывать влияние перекрытия на показатели качества упрочненного слоя. Использовалась экспериментально-аналитическая модель определения глубины и степени упрочнения в зависимости от перекрытия пластических отпечатков. Модель включает комплексный технологический параметр, связывающий кратность деформирующего воздействия с размерами единичного отпечатка – коэффициент перекрытия отпечатков:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60}, \quad (7)$$

где s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; δ – характерный размер отпечатка, измеряемый в направлении подачи, мм; f – частота ударов, Гц.

Выявлена зависимость эпюры микротвердости (глубины и степени упрочнения поверхностного слоя) упрочненного материала от коэффициента перекрытия отпечатков:

$$HV = [a_1 - a_2 Kh - a_3 \ln h + a_4 \ln K] \cdot 10, \quad (8)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – эмпирические коэффициенты по табл. 2.

2. Эмпирические коэффициенты для ф. (3)

Сталь	a_1	a_2	a_3	a_4
45	301,928	5,428	26,798	21,815
9ХС	405,716	2,851	24,260	15,207

Установлено, что вид зависимости одинаков для различных материалов. Это позволило разработать методику расчета глубины и степени упрочнения поверхностного слоя деталей из различных материалов исходя из известных размеров единичных отпечатков, глубины и степени упрочнения под ними и коэффициента перекрытия пластических отпечатков.

В четвертой главе представлены алгоритмы решения прямой задачи – определение показателей качества поверхностного слоя по заданным значениям параметров СИО, и обратной задачи – расчет параметров СИО в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя. Приведено описание разработанного программного продукта, позволяющего автоматизировать вычисления при решении прямой и обратной задачи, даны практические рекомендации по применению программного продукта для расчета параметров СИО и показателей качества упрочненного СИО поверхностного слоя, представлены регрессионные модели, определяющие рациональную режимную область процесса СИО.

На практике для СИО все более востребованной является обратная задача. В начале расчета задаются исходные характеристики упрочняемого материала: марка, исходная твердость HV_0 (МПа), максимально достигаемая степень упрочнения для данного материала ΔHV_{\max} (%), которая может быть выбрана из таблицы 1. Вводятся требуемые показатели качества упрочненного поверхностного слоя: степень упрочнения ΔHV (%), глубина упрочнения h_K (мм), шероховатость поверхности в направлении подачи R_z (мкм), вариант равномерности упрочнения:

- предельно неравномерно упрочненный поверхностный слой ($K < 0,25$);
- тонкий верхний равномерно упрочненный слой (15...25 % от общей глубины упрочненного слоя) и ниже расположенный неравномерно упрочненный слой ($0,25 \leq K < 0,5$);
- толстый верхний равномерно упрочненный слой (25...50 % от общей глубины упрочненного слоя) и ниже расположенный неравномерно упрочненный слой ($0,5 \leq K \leq 0,8$);

- равномерно упрочненный поверхностный слой практически по всей глубине ($K < 0,8$).

Полученные в результате расчета по алгоритму режимы СИО должны обеспечивать глубину и степень упрочнения не менее заданных, а шероховатость - не более заданной. В результате расчета определяются искомые значения $A_y, f, s, P_{ст}, R_{11}, R_{21}, L_2$, и d_2 .

На основании полученных алгоритмов разработан и зарегистрирован в Роспатенте программный продукт, который позволяет значительно сократить время расчетов, а также провести глубокие исследования взаимосвязей между технологическими и конструктивно-технологическими параметрами СИО и показателями качества поверхностного слоя в широком диапазоне, сформулировать рекомендации по применению СИО.

Программный продукт позволяет решать задачи:

- создания, редактирования и копирования проектов и отдельных задач проекта;
- проведения расчетов в заданном диапазоне одного или двух варьируемых параметров;
- создания и редактирования диаграмм;
- формирования отчетов;
- печати исходных данных, результатов расчета, диаграмм и отчетов;
- экспорта исходных данных, результатов расчета, диаграмм и отчетов в программы «Microsoft Word» и «Microsoft Excel».

Структура программного продукта представлена на рисунке 6.

Главным элементом управления разработанного программного продукта является «Панель управления», которая позволяет создавать, открывать и сохранять проекты, осуществлять доступ и управление другими модулями, пользоваться справочником по программно-информационному обеспечению и переходить в режим интерактивного обучения. Вновь открытый или созданный проект получает статус *текущего проекта*. Элементы структуры *текущего проекта* объединены пунктирной линией. Штрихпунктирной линией выделена единая структура модулей программы:

- редактор задач;
- редактор результатов;
- модуль диаграмм;
- модуль расчета;
- модуль формирования отчетов;
- модуль печати;
- модуль экспорта данных.

В отличие от «Панели управления», модули имеют возможность взаимодействия только лишь с элементами текущего проекта. Структура модулей программы подчинена главному компоненту – «Панели управления», который имеет возможность управления каждым проектом. Вместе с тем, некоторые модули могут непосредственно взаимодействовать между собой (например «Модуль диаграмм» и «Модуль расчета»).

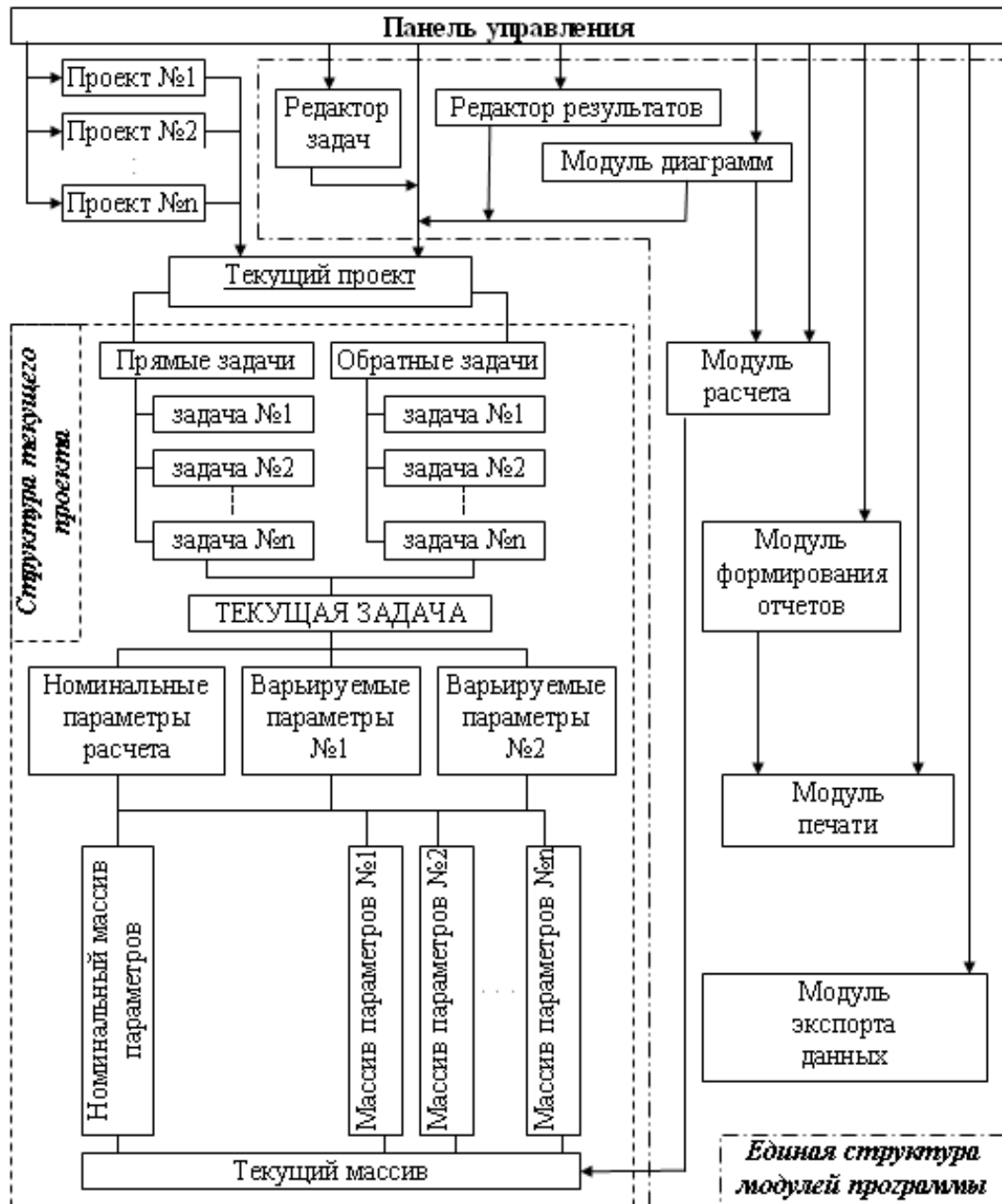


Рис. 6. Структура программно-информационного обеспечения

Разработанный программный продукт значительно облегчает задачу технолога по выбору необходимых режимов СИО для обеспечения требуемых показателей качества поверхностного слоя упрочняемой детали. Появляется возможность определить различного рода зависимости между показателями качества и параметрами СИО. В результате обработки в пакете Statistica большого массива данных, сформированного в результате расчетов в разработанном программном продукте, получены регрессионные модели, описывающие взаимосвязи технологических и конструкторско-технологических параметров и показателей качества поверхностного слоя:

$$P_u = -63,05 + 11,4 \cdot h + 10,9 \cdot r + 0,006 \cdot Rz - 5,58 \frac{A}{B}, \quad (9)$$

$$s = 60 f(1 - K) \left(0,14h + 0,04Rz + 0,07 \frac{A}{B} \right), \quad (10)$$

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} \right); \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} \right),$$

где *технологические параметры*: P_u – амплитуда ударных импульсов, кН; s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; f – частота ударных импульсов, Гц;

конструкторско-технологические параметры: r' – отношение площадей поперечных сечений бойка и волновода, A/B – отношение главных кривизн контактирующих поверхностей инструмента и заготовки, R_{11} , R_{21} – профильные радиусы инструмента, мм; R_{21} , R_{22} – радиусы кривизны обрабатываемой поверхности детали, мм;

показатели качества упрочненного поверхностного слоя: h – глубина упрочнения, мм; Rz – параметр шероховатости упрочненного слоя, мкм; K – коэффициент перекрытия пластических отпечатков, характеризующий равномерность упрочнения.

Полученные регрессионные зависимости позволяют осуществить ускоренный поиск рациональной режимной области СИО, провести ее исследование (рис. 7) в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя, сформулировать технологические рекомендации для решения конкретных производственных задач.

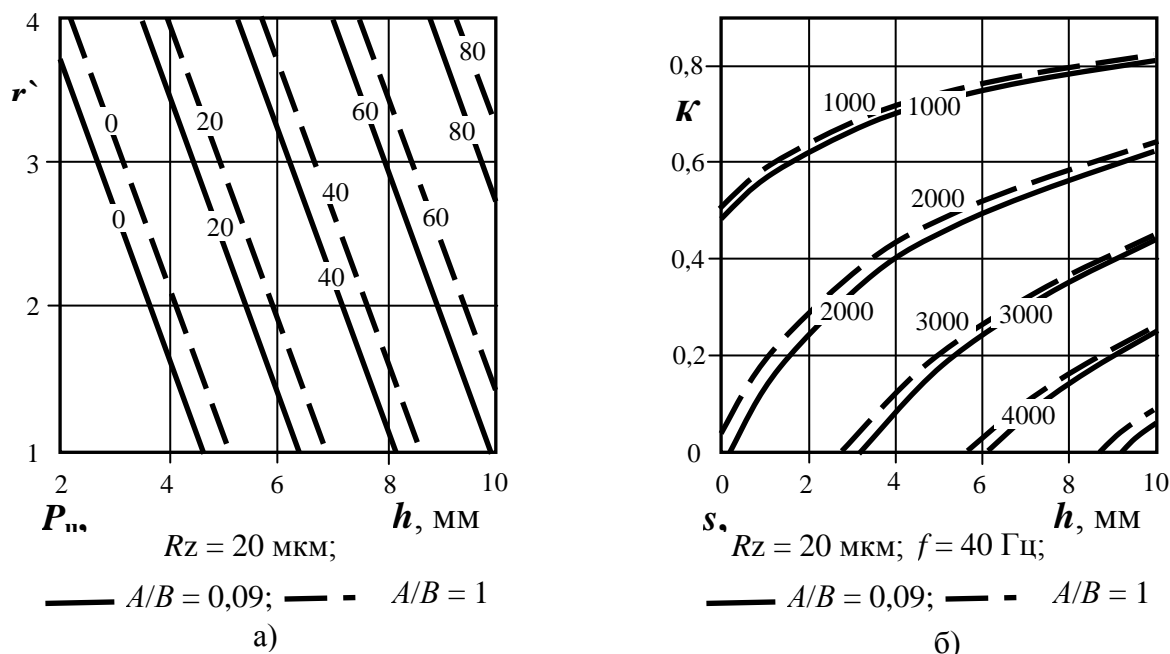


Рис. 7. Зависимость амплитуды импульсов от глубины упрочнения, отношения главных кривизн контактирующих поверхностей инструмента и заготовки, отношения площадей поперечных сечений бойка и волновода (а), коэффициента перекрытия (б)

Внедрение технологии СИО совместно с разработанной программой в производство ООО «Воронежский станкозавод – холдинг» позволило повысить несущую способность упрочненных деталей в 1,4...2 раз по сравнению с базовым технологическим процессом. Экономический эффект от внедрения составил 200 т. руб./год.

Общие выводы и результаты

1. В результате выполненного комплекса теоретико-экспериментальных исследований решена научная проблема ускоренного определения рациональной режимной области статико-импульсной обработки и назначения эффективных параметров в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя, имеющая существенное значение для технологии деформационного упрочнения.

2. Разработан информационно-аналитический комплекс, отражающий взаимосвязи между технологическими и конструкторско-технологическими параметрами СИО с одной стороны, и показателями качества обрабатываемого поверхностного слоя с другой стороны.

3. Установлено, что необходимыми элементами комплекса являются следующие взаимосвязанные модели: модель волновых состояний элементов ударной системы и динамической составляющей силы деформирования (формы импульса) в пятне контакта инструмента и заготовки в произвольный момент времени, модель сопротивления материала внедрению инструмента, модель определения энергии ударного импульса, модель определения глубины упрочнения и пластической деформации под единичным отпечатком, экспериментально-аналитическая модель определения глубины и степени упрочнения в зависимости от перекрытия пластических отпечатков.

4. Разработан программный продукт, позволяющий автоматизировать расчеты и значительно сократить время поиска рациональной режимной области, провести исследования взаимосвязей между технологическими и конструкторско-технологическими параметрами СИО и показателями качества поверхностного слоя в более широком диапазоне, разработать рекомендации по расширению области применения СИО.

5. Установлено, что использование в комплексе моделей постоянного коэффициента сопротивления внедрению вносит существенные погрешности в расчеты. Введение функциональной зависимости для коэффициента сопротивления внедрению позволяет уточнить значение амплитуды головной и хвостовой части ударного импульса до 23 %, а энергетические характеристики - до 37 %.

6. Установлено, что отличие характера функциональной зависимости коэффициента сопротивления внедрению от линейного не оказывает существенного влияния на результаты расчетов.

7. Установлена адекватность результатов расчета по уточненной модели формы ударных импульсов и параметров деформированного слоя экспериментальным данным.

8. Установлено, что на эшюру микротвердости преимущественное влияние оказывает коэффициент перекрытия единичных отпечатков. Установлено, что вид зависимости микротвердости от коэффициента перекрытия отпечатков по глубине упрочненного слоя имеет общий характер для различных материалов.

9. Разработаны алгоритмы для решения прямой задачи, направленной на определение показателей качества поверхностного слоя по заданным значениям параметров СИО, а также обратной задачи, направленной на расчет параметров СИО в зависимости от требуемых показателей качества поверхностного слоя.

10. Выявлены новые взаимосвязи между технологическими параметрами статико-импульсной обработки: амплитудой, частотой ударных импульсов, скоростью подачи заготовки относительно инструмента; конструкторско-технологическими параметрами: отношением площадей поперечных сечений бойка и волновода, отношением главных кривизн контактирующих поверхностей инструмента и заготовки, и показателями качества упрочненного поверхностного слоя: глубиной упрочнения, шероховатостью упрочненного слоя, равномерностью упрочнения. Полученные регрессионные модели позволяют осуществить ускоренный поиск рациональной режимной области СИО.

11. Выполнена апробация полученных практических рекомендаций в производственных условиях.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Монографии:

1. Волобуев А.В. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Н. Афонин, А.В. Волобуев. М.: Машиностроение-1, 2009. 170 с.

Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК:

2. Волобуев А.В. Информационное обеспечение статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, А.В. Волобуев, Д.Е. Тарасов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2008. № 4-2. С. 4-11.

3. Волобуев А.В. Экспериментальный комплекс для исследований контактно-усталостного изнашивания деталей машин [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, Д.Е. Тарасов, А.В. Волобуев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2009. №3-2. С. 7-13.

4. Волобуев А.В. Управление формированием ударных импульсов при деформационной статико-импульсной обработке [Текст] / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, А.А. Захаров, А.В. Волобуев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. - № 6 (284). С.51-57.

5. Волобуев А.В. Разработка параметров для описания гетерогенно упрочненной структуры [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Волобуев, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С.7-9.

6. Волобуев А.В. Особенности формирования упрочненного поверхностного слоя отверстий статико-импульсной обработкой / А.В.

Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, А.В. Поляков, А.В. Волобуев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. - № 6. С. 84-89

Список публикаций в других изданиях:

7. Волобуев А.В. Инновационная статико-импульсная обработка [Текст] / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Волобуев А.В. // *Научно-технические проблемы в машиностроении*. 2011. № 1. С. 43-48.

8. Волобуев А.В. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенной структуры [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, Д.Е. Тарасов, А.В. Волобуев // *Высокие технологии в машиностроении: Мат. Всероссийской научно-техн. интернет-конф. с международным участием – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. С. 234-236.*

9. Волобуев А.В. Упрочнение металла импульсами деформации [Текст] / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Волобуев А.В. // *Мат. междунар. симпоз. «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы»*. Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, В 5 т. Т.1. 2010. С. 399-403.

10. Волобуев А.В. Использование упрочнения статико-импульсной обработкой для повышения долговечности деталей машин [Текст] / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, А.В. Волобуев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // *Сб. трудов междунар. научн.-техн. конф. «Новые материалы и технологии в машиностроении»*. Вып. 12. Брянск: БГИТА, 2010. С. 110-113.

Список патентов и свидетельств о регистрации программных продуктов:

11. Патент РФ № 2457098. Способ статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Васильев А.В., Афанасьев Б.И., Тарасов Д.Е., Баринов С.В., Волобуев А.В. Бюл. № 21, 2012.

12. Патент РФ № 2457099. Устройство для статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Васильев А.В., Афанасьев Б.И., Тарасов Д.Е., Баринов С.В., Волобуев А.В. Бюл. № 21, 2012.

13. Расчет параметров статико-импульсной обработки (программа для ЭВМ) / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, А.Н. Афонин, А.В. Волобуев. Свидетельство о рег. программы для ЭВМ № 2009610110 Зарег. в реестре программ для ЭВМ, 2009.

Подписано к печати 19.11.2012 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 150 экз.

Заказ № 362

Отпечатано в ОГУП «Орловская областная типография «Труд»
302028, Орел, ул. Ленина, 1