

На правах рукописи



ТАРАСОВ ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ  
КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ  
ОБРАБОТКОЙ И ЦЕМЕНТАЦИЕЙ**

Специальность 05.02.08 - «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Орел, 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» 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: Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Донской государственный  
технический университет»,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Бабичев Анатолий Прокофьевич

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Южный федеральный университет»,  
профессор кафедры «Механики»,  
Бутенко Виктор Иванович

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Брянский государственный  
технический университет»

Защита состоится «06» сентября 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного Совета Д212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д 212.182.06  
кандидат технических наук



Ю.В. Василенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Циклические контактные нагрузки, действующие на рабочие поверхности деталей машин и механизмов, к которым относятся зубчатые колеса, подшипники качения, рельсы и рельсовые колеса, прокатные валки, толкатели кулачков, бойки, элементы червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, направляющие, шлицевые соединения с телами качения, обгонные роликовые муфты и т.д., - являются причиной потери их работоспособности. Среди возможных путей повышения контактной выносливости таких деталей большое внимание отводится упрочняющим технологиям, созданию необходимой структуры поверхностного слоя.

Цементация позволяет формировать упрочненный слой высокой твердости и значительной глубины, что способствует повышению долговечности при действии контактных циклических нагрузок. Исследованиями А.Ю. Албагачиева, П.Г. Алексеева, А.И. Андрианова, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичева, М.А. Балтер, В.Ф. Безъязычного, В.Ю. Блюменштейна, В.М. Браславского, В.И. Бутенко, М.С. Дрозда, А.А. Ершова, А.В. Киричека, Ю.Р. Копылова, М.М. Матлина, А.А. Михайлова, Л.Г. Одинцова, Н.В. Олейника, Д.Д. Папшева, В.В. Петросова, 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, Ю.Г. Шнейдера, Д.Л. Юдина и др. установлено, что обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) создает градиентный наклепанный слой с остаточными напряжениями сжатия и повышенной твердостью. При этом отсутствует резкий переход от упрочненного материала к основанию, что исключает его отслаивание. При этом большое значение имеет характер изменения свойств металла переходной области.

Использование комбинированных упрочняющих технологий, например, изменение кристаллической структуры поверхности предварительным пластическим деформированием, благоприятно сказывается на последующей цементации (Ю.М. Лахтин, А.Г. Рахштадт, В.П. Леонтьева, Б.Н. Арзамасов, А.А. Попов, Д.Д. Папшев, А.М. Пронин, А.Б. Кубышкин и др.).

Статико-импульсная обработка (СИО), в отличие от других способов ППД, за счет воздействия на поверхность волной деформации позволяет в широких пределах изменять получаемую структуру упрочненного слоя и его свойства на глубине, превышающей глубину цементации. Существует возможность технологически создать гетерогенно (неравномерно) упрочненную поверхность, эффективность которой при работе деталей в условиях контактно-усталостных нагрузок убедительно показана ранее. Следовательно, перспективной технологией создания рабочего поверхностного слоя с возможностью регулирования его свойств в более широких пределах, будет комбинированное упрочнение СИО ППД и цементацией.

**Цель работы:** повышение контактной выносливости тяжело нагруженных поверхностей деталей машин созданием комбинированной упрочняющей технологии, включающей статико-импульсную обработку поверхностным пластическим деформированием и последующие цементацию и закалку.

**Задачи исследования:**

1. Установить характер влияния комбинированной упрочняющей технологии, включающей операции предварительной СИО ППД с последующими операциями цементации и закалки на контактную выносливость деталей машин.
2. Разработать экспериментальный стенд для исследования процессов контактно-усталостного износа и методику определения параметров испытаний.
3. Выявить взаимосвязи технологических параметров комбинированной обработки и микротвердости упрочненного поверхностного слоя.
4. Разработать феноменологическую модель комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией.
5. Выполнить экспериментальные исследования технологических возможностей комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией.
6. Разработать технологические рекомендации.

**Научная новизна.**

1 Разработана новая эффективная технология комбинированного упрочнения волной деформации с последующей цементацией, позволяющая сформировать сложно структурированный несущий слой, содержащий твердую градиентно и равномерно упрочненную поверхность, опирающуюся на гетерогенно упрочненный подслоя.

2 Установлен вид связи между эксплуатационным показателем сопротивления контактному изнашиванию, комплексным технологическим параметром статико-импульсного упрочнения волной деформации, длительностью цементации.

3 Предложена морфологическая матрица (куб) упрочняющих технологий, параметрическими осями которой являются: относительная глубина модифицированного слоя  $t/D$ , равномерность упрочнения  $L_{\Delta H}^h$  и относительное упрочнение  $H_{\mu 0} / H_{\mu}$ , отражающая связь технологии с результатами упрочнения и позволяющая классифицировать практически все разнообразие структурированных в результате упрочнения поверхностных слоев и присвоить им численный индекс в зависимости от значений безразмерных параметров.

**Практическая ценность работы** заключается в определении рациональной области технологических режимов волнового деформационного упрочнения и длительности цементации, разработке модернизированной конструкции экспериментального стенда для исследования процессов контактно-усталостного износа и методики определения параметров испытаний.

**Результаты работы** апробированы и внедрены на предприятие ВМЗ-филиал ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, г. Воронеж.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием «Высокие технологии в

машиностроении» (г. Самара, 2009); региональной научно-практической конференции «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» (г. Орел, 2010); Академических чтениях по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» (г. Москва, 2010); Всероссийской научно-практической конференции-форуме молодых ученых и специалистов «Современная российская наука глазами молодых исследователей» (г. Красноярск, 2011); научной конференции в Самарском научном центре РАН (г. Самара, 2011); Международном Российско-Китайском симпозиуме «Современные материалы и технологии» (г. Хабаровск, 2011); Международной научно-технической конференции «Механика и трибология транспортных систем» (г. Ростов н/Д, 2011); Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (г. Липецк, 2012); Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (г. Рыбинск, 2012); на ежегодных научных конференциях преподавателей и сотрудников ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орел, 2007-2012 г.).

**Диссертация выполнялась при поддержке:** гранта Президента России МД–2698.2007.8 «Разработка информационного обеспечения проектирования генераторов импульсов для деформационного упрочнения деталей машин»; гранта РФФИ № 09-01-99005 «Исследование закономерностей формирования гетерогенных механических свойств материала волной деформации и его долговечности в условиях локальных циклических контактных нагрузок», государственного задания 7.505.2011 «Высокоэффективные технологии комбинированного упрочнения и формообразования поверхностным пластическим деформированием».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 7 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и 6 патентов РФ на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и библиографического списка. Работа изложена на 170 страницах, содержит 15 таблиц, 47 рисунков, и список литературы из 173 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность проблемы создания комбинированной упрочняющей технологии, включающей статико-импульсную обработку поверхностным пластическим деформированием и последующую цементацию и закалку, а также приведена цель работы, сформулирована ее научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** проведен анализ работы поверхностей ответственных деталей тяжело нагруженных машин и механизмов, воспринимающих концентрированные циклические контактные нагрузки. Установлено, что зачастую они выходят из строя вследствие усталостного разрушения. Выявлены

факторы, оказывающие влияние на контактную усталость деталей машин. Для случая контактно-усталостного износа, когда опасная точка располагается на определенной глубине от поверхности, наиболее значимыми из них являются: твердость, глубина и равномерность упрочненного слоя. Выявлены основные технологические способы создания поверхностного слоя, способного воспринимать большие контактные нагрузки: термообработка (ТО), химико-термическая обработка (ХТО), поверхностное пластическое деформирование (ППД). Обоснована необходимость создания комбинированных упрочняющих технологий, наиболее перспективные из которых сочетают способы, имеющие различную физическую природу. Выявлена перспективная технология кратного повышения эксплуатационных свойств деталей, изготавливаемых из цементуемых сталей: комбинированное упрочнение СИО ППД и цементацией.

**Во второй главе** изложена методика экспериментальных исследований и оборудование для их проведения. В качестве образцов для исследований выбраны плоские заготовки размером  $160 \times 160 \times 20$  из легированных низкоуглеродистых цементуемых сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А (ГОСТ 4543-71), часто применяющихся в качестве материала ответственных деталей.

Упрочнение волной деформации осуществлялось на установке для статико-импульсной обработки. В качестве инструментов использовались стержневые ролики из стали Р18 (Р6М5) диаметром 10 мм и шириной 5...7 мм.

Процесс газовой цементации выполнялся в механизированной камерной безмуфельной печи (агрегате) со встроенными закалочными баками, приспособленной для работы с контролируемыми атмосферами. Защитной атмосферой был эндогаз, а насыщающей – природный газ.

В качестве окончательной механической обработки поверхностей, подвергнутых комбинированному упрочнению, использовалось шлифование.

Исследование сопротивления контактно-усталостному износу осуществлялось на разработанном экспериментальном стенде по созданной методике определения значений параметров испытаний. Усредненное время испытаний образцов при  $\sigma_H = 2807$  МПа составило 153 ч, при  $\sigma_H = 2250$  МПа – 765 ч. Из каждой марки стали испытано 84 образца, отличающихся технологическими параметрами комбинированной упрочняющей технологии.

Одним из основных показателей для качественной и количественной оценки влияния комбинированной упрочняющей технологии на контактную выносливость принято сопротивление контактному выкрашиванию  $\Delta I$ . Являясь комплексным, параметр позволяет учитывать изменение размеров следов качения деформирующих шаров и площадей усталостных выкрашиваний на исследуемых участках

$$\Delta I = \frac{S_d}{S_{d0}} \cdot \frac{\Sigma S_0}{\Sigma S}, \quad (1)$$

где  $S_d$  и  $S_{d0}$  - площадь следа качения деформирующих шаров соответственно на комбинированно упрочненном и науглероженном участке,  $\text{мм}^2$ ;  $\Sigma S$  и  $\Sigma S_0$  - суммарная площадь выкрашиваний соответственно на комбинированно упрочненном и науглероженном участке,  $\text{мм}^2$ .

Характер упрочнения поверхностного слоя оценивался измерением микротвердости эквидистантно и вглубь обработанной поверхности. Измерения выполнялись на твердомере портативном ультразвуковом МЕТ-У1, смонтированном на БМИ-1.

**В третьей главе** предложена классификация упрочняющих технологий по технологическим возможностям формирования упрочненного поверхностного слоя. Упрочняющие технологии размещены в трехмерном пространстве в морфологической матрице (рисунок 1). Так как в основу классификации положены относительные параметры, значения которых не превышают единицы, морфологическая матрица представляет собой морфологический единичный куб.

Одна из граней куба (ось  $X$ ) характеризует относительную глубину упрочненного поверхностного слоя  $t/D$  (где  $t$  - глубина модификации, мм;  $D$  - характерный размер детали, мм), другая (ось  $Y$ ) – равномерность упрочнения  $L_{\Delta H}^h$ , третья (ось  $Z$ ) – относительное упрочнение  $H_{\mu 0}/H_{\mu}$ .

Конкретная упрочняющая технология занимает определенное пространство ячеек морфологического куба, в зависимости от диапазона технологических возможностей по обеспечению параметров качества модифицированного поверхностного слоя. Одна и та же ячейка морфологического куба может принадлежать нескольким упрочняющим технологиям. Поверхностный слой, полученный в результате любой упрочняющей технологии, имеет зависящую от сочетания перечисленных параметров несущую способность, занимает строго определенную ячейку внутри куба и имеет уникальный код ( $X, Y, Z$ ).

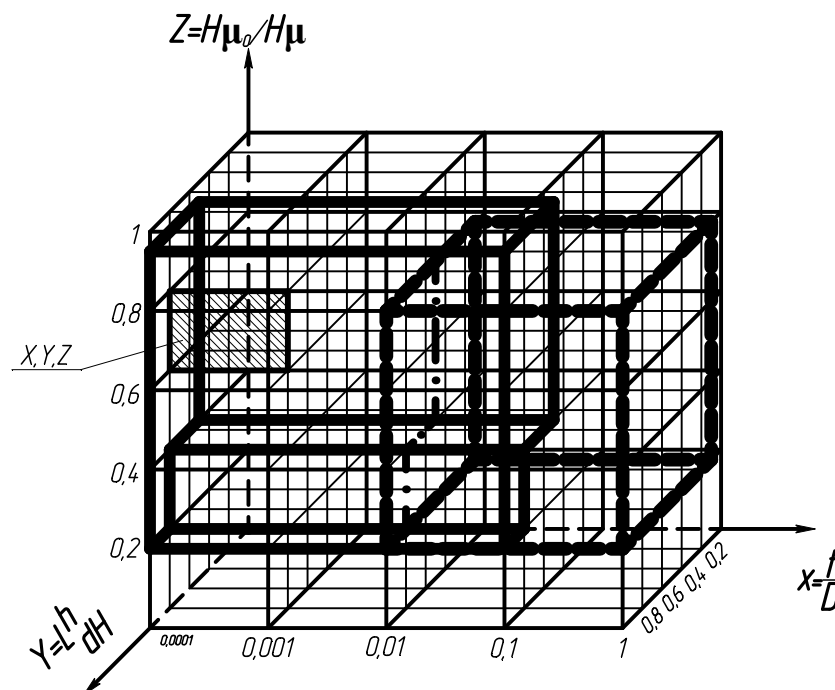


Рисунок 1 – Морфологическая матрица упрочняющих технологий и сочетаний параметров, характеризующих качество поверхностного слоя

К достоинствам предлагаемой классификации (морфологического куба) относится не только наглядность, но и помощь в поиске соответствий между

несущей способностью поверхностного слоя в определенных эксплуатационных условиях и его уникальным кодом с одной стороны, а также между уникальным кодом поверхностного слоя и упрочняющими технологиями и их технологическими параметрами – с другой стороны.

Толстой сплошной линией обозначена область ячеек морфологического куба по обеспечению параметров качества модифицированного поверхностного слоя существующими упрочняющими технологиями.

Возможный диапазон значений параметров морфологической матрицы для предлагаемой комбинированной технологии СИО ППД+цементация будет следующим:  $t/D \approx 0,01...1$ ;  $H_{\mu 0}/H_{\mu} \approx 0,2...0,8$  (область ячеек выделена толстой штриховой линией). Параметр  $L_{\Delta H}^h$  может изменяться практически от нуля и до единицы, что означает возможность управления равномерностью упрочненной структуры в максимально возможном диапазоне.

Штрихпунктирной линией обозначено место пересечения двух областей, соответствующих существующим способам упрочнения и рассматриваемой комбинированной технологии.

Методом «черного ящика» (рисунок 2) рассмотрены связи между управляемыми технологическими факторами комбинированной упрочняющей технологии и эксплуатационными свойствами упрочненного поверхностного слоя, подверженного воздействию локальных контактных нагрузок.

Совокупное влияние входных технологических факторов на характер процесса проявляется через изменение внутренних параметров комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией: удельной энергии удара, размера пластического отпечатка, коэффициента перекрытия пластических отпечатков, толщины диффузионного слоя, концентрации углерода в поверхностном слое и по глубине.

Удельная энергия удара  $a$  и коэффициент перекрытия пластических отпечатков  $K$  относятся к внутренним факторам, интегрально характеризующим процесс. Коэффициент перекрытия  $K$  связывает размеры пластического отпечатка  $\delta$  с кратностью деформирующего воздействия

$$K = 1 - \frac{s}{\delta^2 60}. \quad (2)$$

Размеры пластического отпечатка, в свою очередь, определяются совокупностью таких факторов, как кривизна сопряженных поверхностей в пятне контакта, физико-механическими свойствами материалов обрабатываемой детали и инструмента, энергосиловыми параметрами статико-импульсной обработки. Диапазон варьирования  $K$  при проведении исследований составлял:  $0,2 \leq K \leq 0,6$ .

Учитывая сложность теоретического описания физических закономерностей формирования упрочненного слоя в процессе комбинированной технологии упрочнения СИО ППД и цементацией, предложена феноменологическая модель процесса комбинированного упрочнения, объясняющая механизм влияния технологических параметров на формирование параметров качества поверхностного слоя и контактную выносливость.



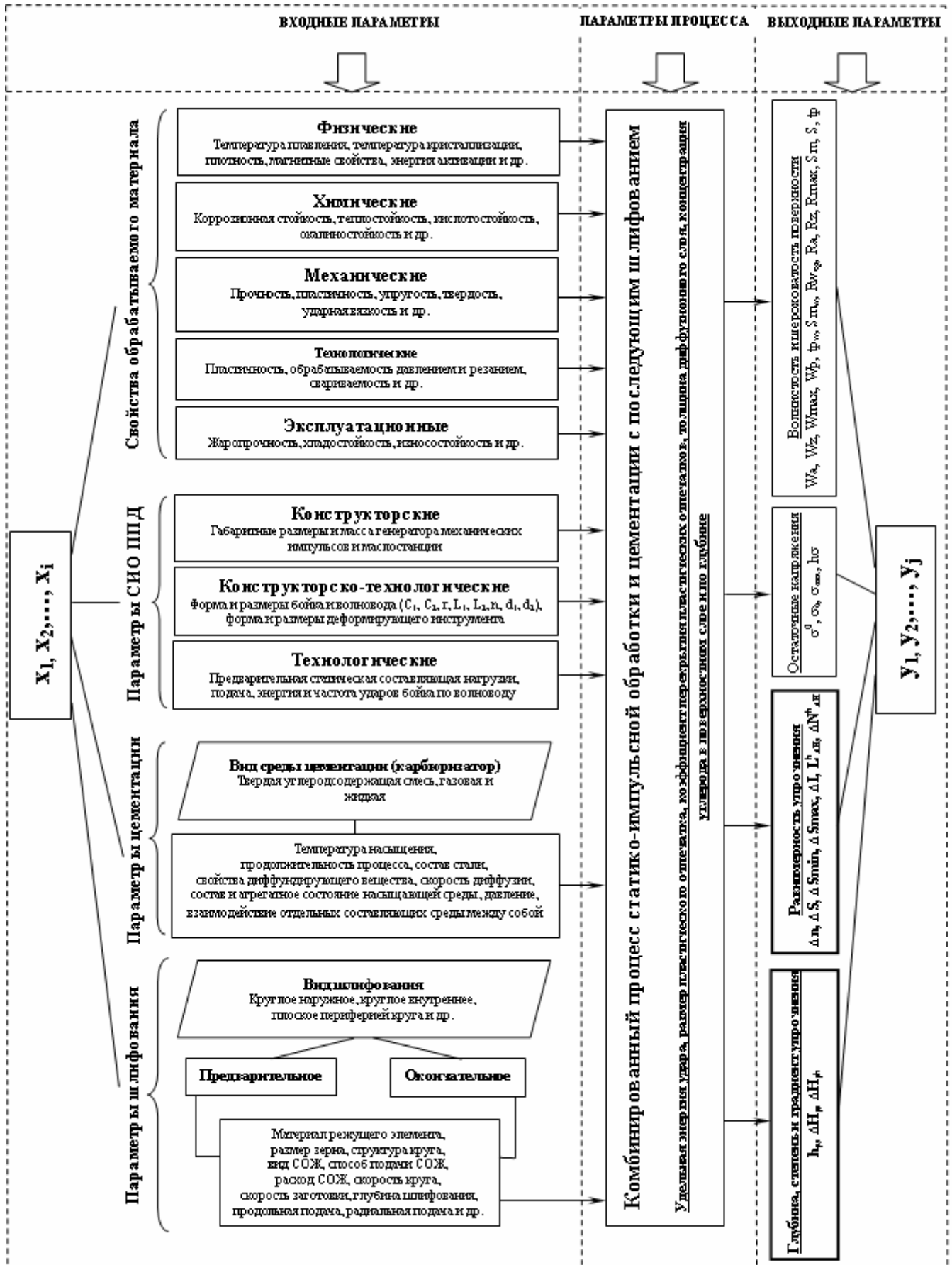


Рисунок 2 – Модель исследования общих закономерностей комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией

Основным требованием выбора параметров цементации является обеспечение высокой поверхностной твердости деталей из сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А - не менее 56HRC. Упрочнение вследствие цементации тесно связано с протеканием процесса диффузии углерода в материале. Следовательно, справедливо к внутренним параметрам процесса отнести толщину диффузионного слоя, концентрацию углерода в поверхностном слое и по глубине. Вследствие различий структуры поверхностного слоя как для различных материалов, так и для одного и того же материала, обработанного по разным технологическим маршрутам, можно предположить, что и процесс диффузии углерода будет проходить неодинаково.

Процесс цементации по своей сути уже является гетерогенным. При его наложении на гетерогенно упрочненный в процессе СИО поверхностный слой можно ожидать усиления гетерогенных процессов.

Процесс диффузии можно представить, как

$$D = f(V_{\text{зерна}} / L_{\text{зерна}}^3), \quad (3)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $V_{\text{зерна}}$  - объем зерна;  $L_{\text{зерна}}$  - протяженность границ зерен.

На процентное содержание (концентрацию) диффундирующего элемента (углерода) в поверхностном слое влияют коэффициент диффузии и время осуществления процесса

$$C = \varphi(D, \tau), \quad (4)$$

где  $C$  - концентрация углерода, %;  $\tau$  - время диффузии, с.

При измельчении зерна поверхностным пластическим деформированием изменяется его объем и протяженность границ. Тогда, при предварительном воздействии СИО ППД они будут зависеть от конструкторско-технологических и технологических параметров процесса

$$V_{\text{зерна}} / L_{\text{зерна}}^3 = \varepsilon(C_1, C_2, L_1, L_2, d_1, d_2, D_p, b_p, P_{\text{ст}}, a, K). \quad (5)$$

В результате, (3) и (4) примут вид

$$D = f(\varepsilon) = f(C_1, C_2, L_1, L_2, d_1, d_2, D_p, b_p, P_{\text{ст}}, a, K), \quad (6)$$

$$C = \varphi(D, \tau) = \varphi(f, \tau) = \varphi(C_1, C_2, L_1, L_2, d_1, d_2, D_p, b_p, P_{\text{ст}}, a, K, \tau). \quad (7)$$

С другой стороны, сопротивление контактному выкрашиванию  $\Delta I$ , как показатель работоспособности материала при воздействии переменных нагрузок, зависит от многих эксплуатационных параметров поверхностного слоя (глубины, степени, градиента и равномерности упрочнения и т.д.)

$$\Delta I = \zeta(h_{\mu}, \Delta H_{\mu}, \Delta H_{\mu h}, \Delta n, \Delta S, \Delta S_{\text{min}}, \Delta S_{\text{max}}, L_{\Delta H}^h, \Delta N_{\Delta H}^h). \quad (8)$$

Обозначенные параметры во многом зависят от распределения углерода как по глубине, так и эквидистантно обрабатываемой поверхности

$$\Delta I = \psi(C). \quad (9)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta I &= \varphi(C_1, C_2, L_1, L_2, d_1, d_2, D_p, b_p, P_{\text{ст}}, a, K, \tau) = \\ &= \zeta(h_{\mu}, \Delta H_{\mu}, \Delta H_{\mu h}, \Delta n, \Delta S, \Delta S_{\text{min}}, \Delta S_{\text{max}}, L_{\Delta H}^h, \Delta N_{\Delta H}^h). \end{aligned} \quad (10)$$

Можно ожидать, что коэффициент перекрытия пластических отпечатков  $K$ , являясь внутренним комплексным параметром СИО, оказывает наибольшее влияние на результаты упрочнения.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований. Проведено исследование микротвердости образцов как после цементации, так и после комбинированного упрочнения волной деформации СИО ППД с последующей цементацией. Построены графики изменения степени упрочнения по глубине упрочненного слоя и эквидистантно упрочненной поверхности (рисунок 3).

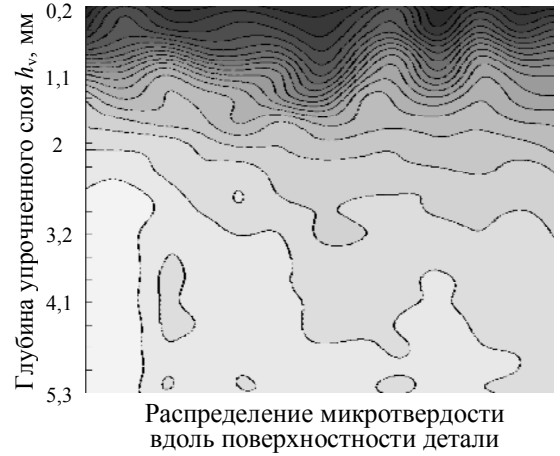
Установлено, что упрочнение волной деформации перед цементацией позволяет в результате повысить степень упрочнения для стали 20Х2Н4А в 1,5 раза, а для стали 18ХГТ в 1,07 раза. При этом на всех выбранных режимах СИО обеспечивалась максимальная степень упрочнения материала. Для стали 18ХГТ упрочнение волной деформации оказывает меньшее влияние, чем для стали 20Х2Н4А.

Установлено, что эпюры распределения микротвердости по глубине и эквидистантно упрочненной поверхности после комбинированного упрочнения отличаются от эпюр, полученных после цементации. Собственно поверхностный слой (наружная часть упрочненного слоя) упрочнен достаточно равномерно (гомогенно) и градиентно, что характерно и для цементованных поверхностей без статико-импульсного упрочнения. Микротвердость эквидистантно поверхности практически не изменяется, степень упрочнения уменьшается по глубине.

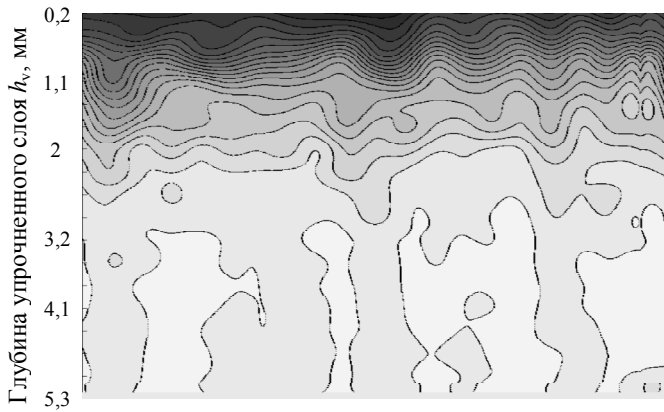
Однако, в отличие от цементации, после комбинированного упрочнения расположенный ниже подповерхностный слой гетерогенный, его микротвердость гораздо в большей степени изменяется эквидистантно поверхности, чем по глубине. Подповерхностный слой постепенно переходит в нецементованную сердцевину. Таким образом, твердый, равномерно упрочненный поверхностный слой «опирается» на гетерогенно упрочненный подслой, структура упрочненного слоя может быть определена как «плита на сваях». Параметры равномерно и гетерогенно упрочненных поверхностных слоев изменяются в зависимости от режимов статико-импульсной обработки волной деформации.

Глубина равномерно упрочненного поверхностного слоя во всех случаях постоянна, порядка 3 мм для стали 20Х2Н4А и 2 мм для стали 18ХГТ, что является результатом неизменных режимов цементации. Степень упрочнения равномерно упрочненного поверхностного слоя в большей степени повышается (в 1,3 раза) с увеличением коэффициента перекрытия  $K$  и незначительно (в 1,06 раза) с увеличением удельной энергии импульса  $a$  (упрочнение стали 20Х2Н4А).

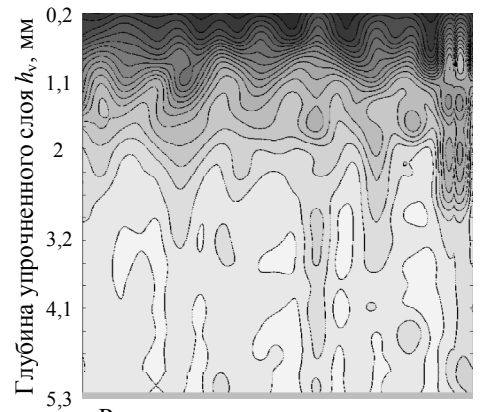
Для гетерогенного упрочненного подслоя характерно чередование более твердых и вязко-пластичных участков. Области высокой твердости вытянуты в направлении, перпендикулярном упрочненной поверхности. С увеличением  $K$  в диапазоне 0,2...0,6, степень упрочнения твердых и мягких участков увеличивается, соответственно в 1,75 и в 2,2 раза (для стали 20Х2Н4А) и в 1,2 и в 1,14 раз (для стали 18ХГТ), а ширина твердых участков (измеряемая вдоль упрочняемой поверхности) и расстояние между ними уменьшается.



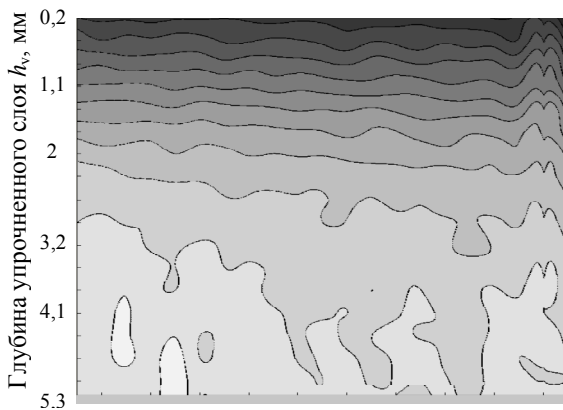
упрочнение СИО ППД с удельной энергией  $a = 5$  Дж/мм и коэффициентом перекрытия  $K = 0,2$  + цементация (сталь 18XGT)



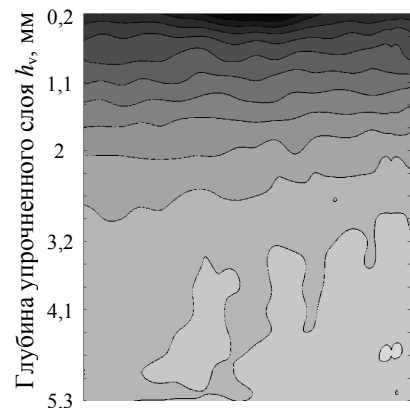
$a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,4$  + цементация (сталь 18XGT)



$a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,6$  + цементация (сталь 18XGT)



$a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,4$  + цементация (сталь 20X2H4A)



$a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,6$  + цементация (сталь 20X2H4A)

**Рисунок 3 – Степень упрочнения по глубине упрочненного слоя и эквидистантно поверхности, после статико-импульсной обработки и цементации, в зависимости от удельной энергии СИО ( $a$ ) и коэффициента перекрытия отпечатков ( $K$ )**

С увеличением  $a$  в диапазоне 3,57...5 Дж/мм характерная длина «свай» увеличивается в 3 раза, и в 1,4 и в 1,6 раза повышается степень упрочнения соответственно твердых и мягких участков (в большей степени для стали 20X2H4A). Строение подслоя определяется технологическими режимами СИО.

Количественное описание закономерностей изменения микротвердости поверхностного слоя, в том числе равномерности упрочнения, выполнено с использованием следующих параметров: относительная опорная твердость  $L_{\Delta H}^h$  и относительное количество упрочненных участков  $\Delta N_{\Delta H}^h$  (рисунок 4).

Параметр  $L_{\Delta H}^h$  позволяет оценить относительную длину всех твердых участков на определенном уровне глубины упрочненного слоя, а параметр  $\Delta N_{\Delta H}^h$  оценить их относительное количество на базовой длине.

Из рисунка 4 а,б видно, что наружная часть упрочненного слоя на глубине, примерно  $h_{\mu.эф} = 3$  мм, имеет достаточно равномерную структуру. Например, для схемы «а», на глубине 0,2 мм от упрочненной поверхности располагается равномерный слой со степенью упрочнения 50...40%. Значения параметров равномерности будут  $L_{\Delta H}^h = 1$ ,  $\Delta N_{\Delta H}^h = 1$ . На глубине 0,5 мм встречаются две структуры с различной степенью упрочнения (50...40% и 40...30%). Их относительная длина имеет примерно равные значения  $L_{50-40\%}^h = 0,55$  и  $L_{40-30\%}^h = 0,45$  при равном количестве ( $\Delta N_{50-40\%}^h = 0,5$ ,  $\Delta N_{40-30\%}^h = 0,5$ ). Затем (на глубине 0,8 мм) идет равномерный слой с  $\Delta HV = 40...30\%$ . Подобный характер изменения микротвердости наблюдается до  $h_{\mu} = 2,9$  мм. Далее располагается гетерогенный слой, состоящий из нескольких участков с различной степенью упрочнения.

Отмечено, что значение  $L_{\Delta H}^h$  для структуры с большей  $\Delta HV$  меняется от большего к меньшему по сравнению с меньшей  $\Delta HV$ , при одновременном увеличении  $h_{\mu}$ . Количество принятых во внимание на базовой длине локальных упрочненных участков одинаково практически на всех исследуемых уровнях.

В результате обработки экспериментальных данных получена математическая модель (11) влияния технологических и эксплуатационных факторов на параметр сопротивления контактному износу. Структура модели для различных исследуемых материалов оставалась постоянной:

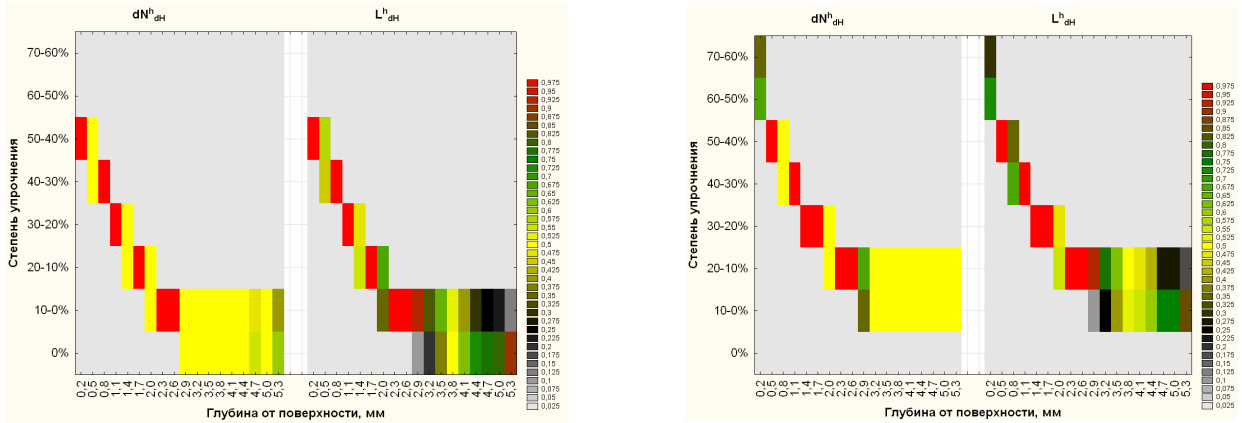
$$\Delta l = (0,0202 + 5,523 \cdot K - 6,736 \cdot K^2) \cdot ((0,001 \cdot \sigma_H - 2,885)^2 + 0,85) \cdot (m \cdot V^{0,954}), \quad (11)$$

где  $\sigma_H$  - максимальное контактное напряжение при испытаниях, МПа;  $V_{окр}$  - окружная скорость деформирующих шаров при испытаниях, м/с;  $m$  - коэффициент (0,566 - для стали 20X2H4A; 0,396 - для стали 18XГТ).

В результате исследований (рисунок 5) установлено, что наилучшие результаты комбинированного упрочняющего воздействия волной деформации и цементацией достигаются при значении комплексного технологического параметра СИО – коэффициента перекрытия единичных отпечатков,  $K = 0,4$ .

В зависимости от условий нагружения  $V_{окр} = 1,94 \div 3,27$  м/с и  $\sigma_H = 2807 \div 2250$  МПа максимально возможные значения  $\Delta l$  для стали 20X2H4A ( $K = 0,4$ ) находятся в диапазоне  $1,1 \leq \Delta l \leq 2,5$ , что свидетельствует о существенном повышении несущей способности поверхности, подвергнутой комбинированному

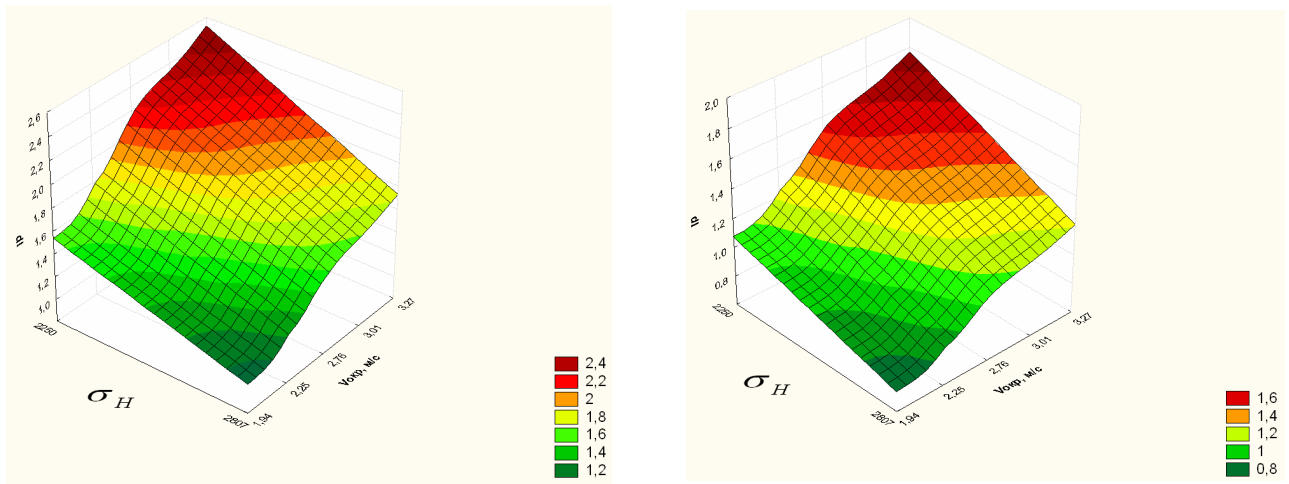
упрочнению. Аналогично для стали 18ХГТ, при  $\sigma_H = 2807$  МПа и  $\sigma_H = 2250$  МПа, окружной скорости  $3,01 \leq V_{окр} \leq 3,27$  м/с и  $2,25 \leq V_{окр} \leq 3,27$  м/с,  $K = 0,4$  сопротивление контактному выкрашиванию меняется в диапазоне  $1,1 \leq \Delta I \leq 1,8$ .



а)  $a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,4$  + цементация

б)  $a = 5$  Дж/мм;  $K = 0,6$  + цементация

Рисунок 4 – Значения относительной опорной твердости  $L^h_{\Delta H}$  и относительного количества упрочненных участков  $\Delta N^h_{\Delta H}$  для определенной степени упрочнения на исследуемом участке поверхности (сталь 20Х2Н4А)



а)

б)

Рисунок 5 – Зависимость сопротивления контактному выкрашиванию  $\Delta I$  от окружной скорости  $V_{окр}$  деформирующих шаров и максимального контактного напряжения  $\sigma_H$  при  $K = 0,4$ : а – Сталь 20Х2Н4А; б – Сталь 18ХГТ

Изменение значения коэффициента перекрытия относительно  $K = 0,4$  приводит к уменьшению сопротивление контактному выкрашиванию, причем в некоторых случаях наблюдается даже снижение несущей способности материала после комбинированного упрочнения СИО ППД и цементации по сравнению с науглероживанием.

По полученным экспериментальным данным, данным технической и справочной литературы, построена диаграмма (рисунок 6), отображающая влияние технологии упрочнения на количество циклов нагружения, воспринимаемых поверхностью до разрушения.

Из рисунка можно сделать вывод о кратном повышении контактной выносливости комбинированно упрочненной поверхности по предлагаемой технологии. Например, работоспособность поверхности образцов из стали 20X2H4A, подвергшихся науглероживанию и воспринимающих контактную нагрузку  $\sigma_H = 1890$  МПа, в 2 раза меньше, чем у поверхности, предварительно обработанной СИО ППД с последующей цементацией при действии  $\sigma_H = 2807$  МПа. При действии  $\sigma_H = 2250$  МПа на упрочненную по исследуемой технологии поверхность, количество циклов нагружения увеличивается примерно в 10 раз по сравнению с простой цементацией и  $\sigma_H = 1890$  МПа.

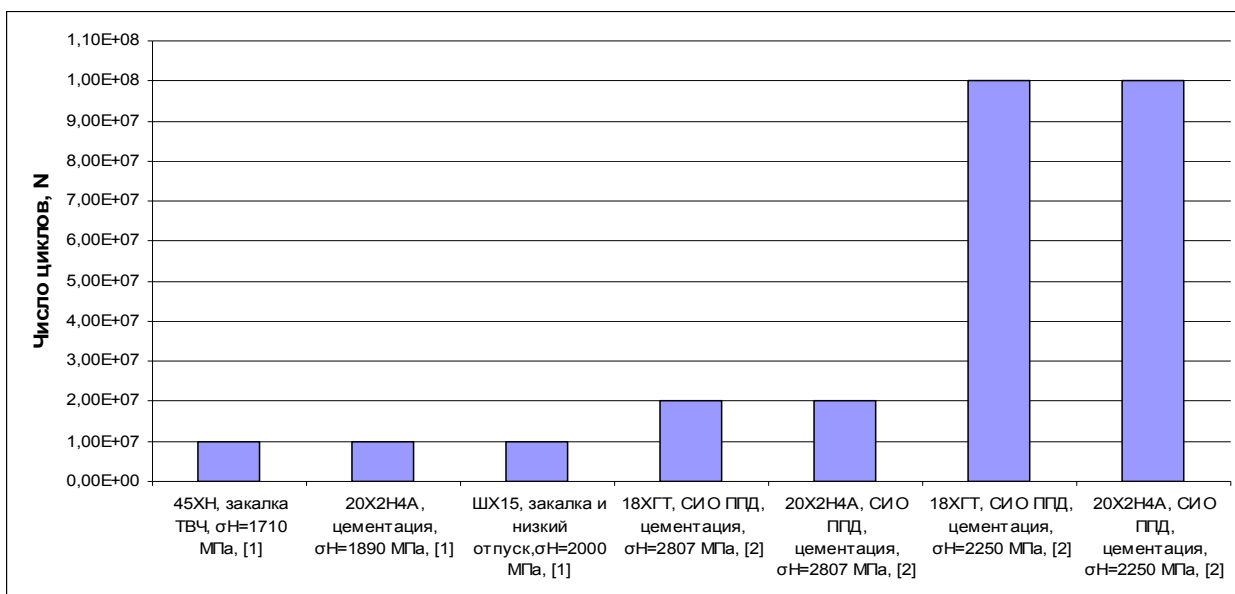


Рисунок 6 – Контактная выносливость сталей, упрочненных различными технологическими способами (HRC 57), где:

[1] – Леликов, О.П. Валы и опоры с подшипниками качения. Конструирование и расчет [Текст]: справочник / О.П. Леликов. – М.: Машиностроение, 2006. – 640 с.; [2] – Данные, полученные при реализации ряда экспериментальных исследований комбинированного упрочнения СИО ППД+ХТО по следующему технологическому маршруту: МО→СИО ППД→Цементация→Шлифование.

Разработаны технологические рекомендации создания сложно структурированного несущего слоя посредством комбинированного упрочнения СИО ППД+цементация для колец упорных шарикоподшипников и накладных направляющих качения из стали 20X2H4A.

Выполнен расчет технико-экономической эффективности разработанной технологии на примере производства колец упорного шарикоподшипника из цементуемой стали 20X2H4A. Установлено, что использование технологической операции комбинированного упрочнения СИО ППД+цементация вместо простого науглероживания приводит не только к кратному повышению контактной выносливости, но и к существенному сокращению необходимого времени цементации и уменьшению технологической себестоимости упрочняющей технологии. Расчетная годовая экономическая эффективность комбинированной упрочняющей технологии составляет 3,6 млн.руб.

## Общие выводы и результаты

1. В работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на создание комбинированной упрочняющей технологии, включающей статико-импульсную обработку поверхностным пластическим деформированием с последующей цементацией и закалкой, обеспечивающей кратное повышение контактной выносливости тяжело нагруженных поверхностей деталей машин.

2. Разработана новая эффективная технология комбинированного упрочнения волной деформации с последующей цементацией, которая позволяет сформировать сложно структурированный поверхностный слой большой глубины (до 5...8 мм), содержащий наружный твердый градиентно и равномерно упрочненный слой, опирающийся на гетерогенно упрочненный подслоя с чередующимися твердыми и вязко-пластичными областями («плита на сваях»). Установлено, что параметры равномерно и гетерогенно упрочненных областей поверхностного слоя существенно зависят от технологических режимов.

3. Установлено, что строение гетерогенного подслоя определяется технологическими режимами статико-импульсной обработки. Области высокой твердости вытянуты в направлении, перпендикулярном упрочненной поверхности. С увеличением комплексного технологического параметра – коэффициента перекрытия  $K$  в диапазоне 0,2...0,6, степень упрочнения твердых и пластичных участков увеличивается, соответственно в 1,75 и в 2,2 раза (для стали 20X2H4A) и в 1,2 и в 1,14 раз (для стали 18ХГТ), а ширина твердых участков (измеряемая эквидистантно упрочняемой поверхности) и расстояние между ними уменьшается. С увеличением удельной энергии импульса  $a$  в диапазоне 3,57...5 Дж/мм характерная длина «свай» увеличивается в 3 раза, и в 1,4...1,6 раза повышается степень упрочнения соответственно твердых и более пластичных участков.

4. Установлено, что воздействие волной деформации перед цементацией сталей 20X2H4A и 18ХГТ позволяет повысить максимальную степень упрочнения поверхностного слоя до 1,5 раз по сравнению с одним только науглероживанием. Установлено, что степень упрочнения равномерно упрочненного поверхностного слоя повышается в 1,3 раза с увеличением коэффициента перекрытия пластических отпечатков.

5. Установлено, что при рациональном значении комплексного технологического параметра  $K = 0,4$  технология комбинированного упрочнения обеспечивает увеличение сопротивления контактному выкрашиванию  $\Delta I$  для стали 20X2H4A до 2,5 раз, а для стали 18ХГТ – до 1,8 раза.

6. Выполнено количественное описание закономерностей изменения микротвердости поверхностного слоя, в том числе равномерности упрочнения, с использованием следующих параметров: относительная опорная твердость  $L_{\Delta H}^h$  и относительное количество упрочненных участков  $\Delta N_{\Delta H}^h$ . Параметр  $L_{\Delta H}^h$  позволяет оценить относительную длину всех твердых участков на определенном уровне



глубины упрочненного слоя, а параметр  $\Delta N_{\Delta H}^h$  - их относительное количество на базовой длине.

7. Разработана технологическая оснастка и методика определения параметров испытаний для исследования процесса контактно-усталостного износа поверхностей образцов, подвергшихся комбинированному воздействию СИО ППД+цементация.

8. Предложена феноменологическая модель процесса комбинированного упрочнения СИО ППД и цементацией, объясняющая механизм влияния технологии комбинированного упрочнения на формирование параметров качества поверхностного слоя и контактную выносливость. Выявлено, что коэффициент перекрытия пластических отпечатков  $K$ , являясь внутренним комплексным параметром СИО, оказывает наибольшее влияние на результаты упрочнения.

9. Разработана модель комбинированной упрочняющей технологии в виде «черного ящика», с выделением входных, выходных и внутренних факторов. Выявлены качественные зависимости между параметрами процесса и сопротивлением контактному выкрашиванию  $\Delta I$ .

10. Разработана экспериментальная математическая модель, позволяющая определить значение сопротивления контактному выкрашиванию при изменении коэффициента перекрытия  $K$ , максимального контактного напряжения  $\sigma_H$  и окружной скорости  $V_{\text{окр}}$  при испытаниях на контактную усталость.

11. Предложен морфологический куб упрочняющих технологий и структурированных в результате упрочнения поверхностных слоев, ребрами которого являются параметрические оси: относительная глубина модифицированного слоя  $t/D$ , равномерность упрочнения  $L_{\Delta H}^h$  и относительное упрочнение  $H_{\mu 0}/H_{\mu}$ , к достоинствам которого относится наглядность, ускоренный поиск соответствий между несущей способностью поверхностного слоя в определенных эксплуатационных условиях и его уникальным кодом с одной стороны, а также между уникальным кодом поверхностного слоя и упрочняющими технологиями и их технологическими параметрами – с другой.

12. Разработаны технологические рекомендации создания сложно структурированного несущего слоя посредством комбинированного упрочнения. На примере изготовления колец упорного шарикоподшипника из стали 20Х2Н4А определена расчетная годовая экономическая эффективность комбинированной упрочняющей технологии, составляющая 3,6 млн.руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах  
Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК:**

1 **Тарасов Д.Е.** Установка для упрочнения волной деформации [Текст] / С.В. Андреев, А.В. Киричек [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2012. – № 3-3 (293). – С. 53-58.

2 **Тарасов Д.Е.** Возможности повышения долговечности деталей машин из цементуемых сталей комбинированным упрочнением [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов // *Вестник Рыбинского государственного*

авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2012. – № 2 (23). – С. 65-67.

3 **Тарасов Д.Е.** Повышение контактной долговечности цементуемых подшипниковых стале́й комбинированной обработкой [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – № 4/2 (288). – С. 83-90.

4 **Тарасов Д.Е.** Экспериментальный комплекс для исследований контактно-усталостного изнашивания деталей машин [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // *Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2009. – № 3-2/275 (561). – С. 7-13.

5 **Тарасов Д.Е.** Информационное обеспечение статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // *Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2008. – № 4/272 (550). – С. 4-11.

6 **Тарасов Д.Е.** Методы определения динамических характеристик генератора импульсов для статико-импульсной обработки [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // *Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2008. – № 4-4/272 (550). – С. 4-7.

7 **Тарасов Д.Е.** Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД [Текст] / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2007. – № 10. – С. 44-47.

#### **Публикации в материалах конференций:**

8 **Тарасов Д.Е.** Повышение контактной выносливости деталей из цементуемых стале́й комбинированным упрочнением [Текст] / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов // *Сб. докладов Междунар. научн.-техн. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011) / ФГБОУ ВПО РГУПС.* – Ростов н/Д, 2011. – С. 358-361.

9 **Тарасов Д.Е.** Повышение контактной выносливости деталей из цементуемых стале́й упрочнением волной деформации [Текст]: Том 13 (39) / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2011. – № 4 (4). – С. 966-969.

10 **Tarasov D.E.** Operation-routing sequence development for successive strengthening by chemical thermal treatment and surface plastic forming [Текст] / A.V. Kirichek, D.E. Tarasov // *Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Symposium. Proceedings.* – 2011. – P. 239-240.

11 **Тарасов Д.Е.** Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенной структуры [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // *Матер. Всерос. научн.-техн. интернет-конф. с междунар. участием «Высокие технологии в машиностроении» / Самар. Гос. Техн. Ун-т.* – Самара, 2009. – С. 234-236.

#### **Патенты:**

12 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2357227 Устройство для испытаний на контактную выносливость поверхностей деталей машин / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. *Бюлл. № 15, 2009.*

13 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2357228 Способ испытаний на контактную выносливость / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. Бюлл. № 15, 2009.

14 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2357229 Способ комплексных испытаний на контактную выносливость поверхностей деталей машин / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. Бюлл. № 15, 2009.

15 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2357230 Устройство для испытаний на контактную выносливость / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. Бюлл. № 15, 2009.

16 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2364490 Способ статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. Бюлл. № 23, 2009.

17 **Тарасов Д.Е.** Патент РФ № 2364491 Устройство для статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек [и др.]. Бюлл. № 23, 2009.

#### **Главы коллективных монографий и учебные пособия:**

18 **Тарасов Д.Е.** Устройства для деформационного упрочнения деталей машин комбинированным статико-импульсным воздействием [Текст]: глава коллективной монографии «Прогрессивные узлы и агрегаты технологических машин» / А.В. Киричек [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 232-265, ил.

19 **Тарасов Д.Е.** Исследование контактного выкрашивания поверхностей деталей машин [Текст]: глава коллективной монографии «Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий» / А.В. Киричек [и др.]; под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 294-332, ил.

20 **Тарасов Д.Е.** Технологические методы упрочнения деталей машин [Текст]: учеб. пособие / А.В. Киричек [и др.]. – 2-е изд. – М.: Машиностроение-1, 2009. – 282 с.