

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи
621.787

КАСТЕРИН АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ГИДРОДРОБЬЕСТРУИНОМ УПРОЧНЕНИИ

Специальность 05.03.01 - "Процессы механической
и физико-технической обработки, станки и инструменты"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре "Станки и инструмент" Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор МИРНОВ И.Я.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ИСНОМАРЬЕВ В.П.,
кандидат технических наук
РАВИСКИЙ А.И.

Ведущее предприятие - НИО "КОРПУС" (г. Екатеринбург).

Защита состоится " _____ " _____ 1993 г., в _____ часов,
на заседании специализированного совета К053.13.07 Челябинского государственного технического университета по адресу:
454060, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного технического университета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1993 года

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
профессор



В.Г.Шаламов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышение долговечности деталей машин обеспечивает экономию труда и металла, увеличивает конкурентную способность изделий. Одним из факторов, обеспечивающим долговечность и надежность деталей, является состояние поверхностного слоя, сформированного при обработке деталей методами поверхностного пластического деформирования (ППД), куда входит и гидродробеструйное упрочнение (ГДУ).

Обеспечение качественных параметров обрабатываемых поверхностей деталей названными методами решающим образом зависит от режимов обработки. При этом одним из важных условий успешного использования того или иного метода ППД в производстве является возможность прогнозирования остаточных напряжений в поверхностном слое, определяющих его эксплуатационные свойства. Однако отсутствие полноты изучения отдельных методов ППД на практике сдерживает их успешное внедрение в производство. Именно к таким, недостаточно изученным методам относится и метод гидродробеструйного упрочнения поверхностей деталей. Существующие в настоящее время математические модели дробеупрочнения, направленные на решение вопроса прогнозирования остаточных напряжений, не обеспечивают приемлемых для практики результатов, так как не отражают взаимосвязь остаточных напряжений с режимами ГДУ и не учитывают приспособляемость материала детали к пластическим деформациям при обработке.

В связи с этим, разработка математической модели, обеспечивающей возможность реального управления остаточными напряжениями при ГДУ, является актуальной.

Цель работы. Повышение эффективности гидродробеструйного упрочнения за счет создания математической модели процесса, учитывающей режимы обработки и приспособляемость материала детали, а также обеспечивающей возможность управления результатами обработки.

Для осуществления поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель процесса ГДУ, учитывающую приспособляемость материала детали при обработке.
2. Разработать алгоритм реализации математической модели упрочнения обрабатываемого материала при заданных режимах обработки.

3. Установить зависимость между остаточными напряжениями и режимами упрочнения.

4. Разработать модель ГДУ, учитывающую вероятностный разброс входных и выходных параметров процесса обработки.

5. Разработать комплекс мероприятий, способствующих внедрению гидродробеструйного упрочнения в производство.

Автор защищает:

- модель приспособляемости материала при применении методов ДУ;

- модель формирования остаточных напряжений по глубине обрабатываемой поверхности;

- условия формирования тонких растягивающих слоев в поверхностном слое;

- характер расположения по глубине максимальных сжимающих напряжений для различных типов материалов и режимов упрочнения;

- зависимость между временем упрочнения и характером распределения остаточных напряжений по глубине;

- вероятностную модель процесса ГДУ.

Общая методика исследования. Теоретические исследования базируются на основных положениях теории упругости и пластичности, дифференциального и интегрального исчисления, математического анализа, теории удара, методов численного решения дифференциальных уравнений, голографических методов измерения параметров качества материалов.

Научная новизна. 1. Разработана математическая модель формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при гидродробеструйной обработке, учитывающая свойства обрабатываемого материала и режимы обработки.

2. Теоретически показана возможность появления в тонком поверхностном слое при дробеструйном упрочнении растягивающих остаточных напряжений.

3. В явном виде установлена связь между временем упрочнения и остаточными напряжениями.

4. Теоретически показано влияние времени упрочнения на форму эпюры остаточных напряжений, а также влияние рабочего давления, диаметра шариков и предела текучести обрабатываемого материала на параметры эпюры остаточных напряжений.

Практическая ценность. Получены зависимости для определения

остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении, которые можно использовать и для прогнозирования остаточных напряжений и при других способах дробеобработки.

2. Разработаны и реализованы на ПЭВМ программы для численного расчета остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке.

3. Разработана вероятностная оценка влияния разброса параметров процесса на результаты упрочнения.

4. Для обеспечения внедрения гидродробеструйного упрочнения в производство разработаны универсальные и специальные установки для упрочнения деталей типа дисков и валов для различных типов производств.

Реализация Работы. Результаты работы внедрены в ВНИИТРАНС-МАШе (г. Санкт-Петербург) и других предприятиях отрасли. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы 119490 рублей (в ценах на 1.01.91г.).

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации доложены на Всесоюзных и региональных научно-технических конференциях: "Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием" (г. Тольятти, 1988); "Интенсификация машиностроительного производства на основе применения прогрессивных технологий" (г. Санкт-Петербург, 1991); "Остаточные напряжения - резерв прочности в машиностроении" (г. Ростов-на-Дону, 1991); а также на научно-технических конференциях и семинарах в Тюмени (1990г.), Иркутске (1990г.), Челябинске (1988 - 1992 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, депонировано 2 рукописи и выполнено 3 отчета по НИР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка литературы из 52 наименований, приложений. Содержит 128 страниц основного текста, 60 рисунков, 5 таблиц.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Дробеструйное упрочнение является сложным физическим процессом, в котором задействованы многие факторы: тепловые, ударные,

упруго-пластические и др. Основные положения дробеобработки рассмотрены в научных трудах М.М.Саверина, В.В.Петросова, В.А.Смирнова, А.Н.Овсеенко.

В результате упрочнения в материале возникают механические и структурные изменения: формируются остаточные напряжения, увеличивается твердость в поверхностном слое, изменяется структура материала.

Учет влияния на упрочнение всех совокупных факторов, очевидно, не представляется возможным ввиду сложности математического аппарата и отсутствия решений контактных упругопластических задач в конечном виде. Наиболее оптимальным путем представляется выделение особо важных факторов, влияющих на упрочнение и включение их в математическую модель.

Реально процесс упрочнения материала осуществляется за счет большого числа ударов, хаотичным образом распределяемых по обрабатываемой поверхности. Каждый удар шарика о поверхность вносит локальные изменения в состояние поверхностного слоя материала. Множество таких локальных контактов приводит к упрочнению поверхностных слоев материала.

К наиболее важным характеристикам материала при упрочнении относятся остаточные напряжения и твердость материала. Рассмотрев влияние однократного удара на эти характеристики и построив связь между однократным ударом и реальным процессом упрочнения, состоящим из множества однократных ударов, можно описать процесс упрочнения исходя из его физической основы.

Модель однократного упруго-пластического контакта шара с полупространством рассматривается в работах Думаса, Харди, Баронета и других. В основе решения стоит, как правило, модель, составленная из набора упруго-пластических уравнений с заданными граничными условиями в области контакта. Заданная модель решается численными методами (в основном, конечно-элементными). Однако, получаемые расчетные характеристики не могут быть использованы для анализа режимов упрочнения, так как они рассчитаны для однократного контактного взаимодействия. Реально же имеем дело с суммарными эпиграми остаточных напряжений и твердости сформированных от множества ударов шариков по поверхности. Поэтому ключевой задачей является установление связей между однократным ударом и многократным взаимодействием шариков с полупространством при помощи уравнений приспособляемости.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ

Основу математической модели составляют системы дифференциальных уравнений для однократного и многократного взаимодействия шариков и обрабатываемой поверхности и уравнения приспособляемости.

Для построения уравнений приспособляемости необходимо знать циклическую диаграмму деформирования материала. Введем понятие коэффициента упрочнения материала, который определяется по формуле

$$\alpha^{(n)} = \frac{\varphi^{(n)}(\sigma_u^{\max}, \sigma_T^{(n-1)}, \varepsilon_T^{(n)})}{\sigma_u^{\max}} \quad (1)$$

Коэффициент $\alpha^{(n)}$ характеризует диаграмму деформирования. Будем предполагать, что циклическая диаграмма упрочнения подчиняется обобщенному принципу Мазинга, который гласит, что кривая переменного нагружения совпадает с кривой предшествующего нагружения с изменением масштаба в α_ε раз по оси деформаций и в α_σ раз по оси напряжений, причем, в общем случае, α_ε и α_σ могут быть функциями предшествующей деформации $\varepsilon^{(n-1)}$.

$$\alpha_\varepsilon^{(n)} = \alpha_\varepsilon^{(n)}(\varepsilon^{(n-1)}), \quad \alpha_\sigma^{(n)} = \alpha_\sigma^{(n)}(\varepsilon^{(n-1)}) \quad (2)$$

Для упрощения далее будем предполагать, что

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_\sigma = \text{const.}$$

Пусть в результате однократного упруго-пластического контакта шара с полупространством образовалась система остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_z^{\text{ост}} &= \sigma_z^{\text{ост}}(z; Z); \\ \sigma_\theta^{\text{ост}} &= \sigma_\theta^{\text{ост}}(z; Z); \\ \sigma_z^{\text{ост}} &= \sigma_z^{\text{ост}}(z; Z). \end{aligned} \quad (3)$$

Введем понятие средних остаточных напряжений, которые будут определяться по формулам:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_z^{\text{ост}}} &= 2\pi \int_0^R z \sigma_z^{\text{ост}}(z; Z) dz; \\ \overline{\sigma_\theta^{\text{ост}}} &= 2\pi \int_0^R \sigma_\theta^{\text{ост}}(z; Z) dz \end{aligned} \quad (4a)$$

или в декартовых координатах

$$\begin{aligned}\overline{\sigma}_x^{\text{ост}} &= (2/\pi) \left(\overline{\sigma}_z^{\text{ост}} + \overline{\sigma}_\theta^{\text{ост}} \right); \\ \overline{\sigma}_y^{\text{ост}} &= (2/\pi) \left(\overline{\sigma}_z^{\text{ост}} - \overline{\sigma}_\theta^{\text{ост}} \right).\end{aligned}\quad (46)$$

Результаты численных расчетов показывают, что остаточные напряжения распределяются в полупространстве крайне неоднородно. Однако можно показать, что, если поверхность одновременно обрабатывается достаточно большим количеством шариков, то можно вести речь о средних напряжениях и о среднем приращении предела текучести.

Согласно принципу локальной суперпозиции имеем

$$\begin{aligned}\Delta \overline{\sigma}_x^{\text{зост}}(z) &= \overline{\sigma}_x^{\text{ост}}(x_1, y_1, z) + \dots + \overline{\sigma}_x(x_{\Delta N}, y_{\Delta N}, z); \\ \Delta \overline{\sigma}_T^z(z) &= \Delta \overline{\sigma}_T(x_1, y_1, z) + \dots + \Delta \overline{\sigma}_T(x_{\Delta N}, y_{\Delta N}, z),\end{aligned}\quad (5)$$

где $\overline{\sigma}_x^{\text{зост}}$ - суммарные остаточные напряжения, возникающие от ΔN ударов;

$\Delta \overline{\sigma}_T^z$ - приращение предела текучести материала от ΔN ударов;

x, y, z - координаты осей отпечатков.

Перейдем теперь к средним величинам:

$$\begin{aligned}\Delta \overline{\sigma}_x^{\text{зост}}(z) &= \overline{\sigma}_x^{\text{ост}}(z) \cdot \Delta N; \\ \Delta \overline{\sigma}_T^z(z) &= \Delta \overline{\sigma}_T(z) \cdot \Delta N.\end{aligned}\quad (6)$$

Если расход шариков не меняется с течением времени, то можно записать:

$$\begin{aligned}\Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z) &= \overline{\sigma}_x^{\text{ост}}(z) q \Delta t / \Delta S; \\ \Delta \overline{\sigma}^z(z) &= \Delta \overline{\sigma}_T(z) q \Delta t / \Delta S,\end{aligned}\quad (7)$$

где ΔS - площадь упрочнения.

Переходя к пределам, получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{d \overline{\sigma}_x^{\text{зост}}(z, t)}{dt} &= q \overline{\sigma}_x^{\text{ост}}(z) / \Delta S; \\ \frac{d \overline{\sigma}_T^z(z, t)}{dt} &= q \Delta \overline{\sigma}_T(z) / \Delta S,\end{aligned}$$

где q - расход шариков, шт/с·мм².

С учетом уравнений (4а) и (4б), после соответствующих преобразований дифференциальные уравнения окончательно примут вид:

$$\frac{d\overline{\sigma}_T^z(z,t)}{dt} = 2\pi q \left[F(z, l, \alpha) - \frac{l^2}{2} \overline{\sigma}_T^z(z,t) \right]; \quad (9a)$$

$$\frac{d\overline{\sigma}_x^{\text{зост}}}{dt} = 2/\pi (F_2 + F_0),$$

где $F(z, l, \alpha) = \int_0^l z \alpha \sigma_u(z, z) dz;$

$$F_2 = 2\pi \int_0^R z \sigma_2^{\text{ост}}(z, z) dz; \quad (9б)$$

$$F_0 = 2\pi \int_0^R z \sigma_0^{\text{ост}}(z, z) dz,$$

а l находят из уравнения

$$\sigma_u(l, z) = \sigma_T(z, t).$$

Граничные условия для данной системы следующие:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_T^z(z, t) \Big|_{t=0} &= \sigma_T; \\ \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t) \Big|_{t=0} &= 0. \end{aligned} \quad (9в)$$

Остаточные напряжения можно найти, пользуясь теоремой о разгрузке:

$$\begin{aligned} \sigma_2^{\text{ост}}(z, z) &= \sigma_2(z, z, \sigma_T) - \sigma_2^{\text{чпр}}(z, z); \\ \sigma_0^{\text{ост}}(z, z) &= \sigma_0(z, z, \sigma_T) - \sigma_0^{\text{чпр}}(z, z). \end{aligned} \quad (9г)$$

Нагрузочные напряжения σ_2 и σ_0 можно найти, основываясь на решении задачи однократного удара.

4. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ

Как уже было сказано выше, ввиду сложности дифференциальных уравнений упрочнения необходимо привлекать численные методы для разрешения уравнений приспособляемости.

На основе итерационного алгоритма производились численные

расчеты на ЭВМ ЕС 1061. Было исследовано влияние на суммарные остаточные напряжения предела текучести, скорости полета шарика, радиуса шарика и времени упрочнения (рис. I-4).

Для численного решения уравнений (9) в них необходимо сменить dt на Δt , где Δt - должно быть достаточно мало, тогда из (9) легко получить

$$\begin{aligned}\overline{\sigma}_r(z, t + \Delta t) &= \overline{\sigma}_r(z, t) + 2\pi q \Delta t (F(z, \alpha) - \frac{\rho^2}{2} \overline{\sigma}_r), \\ \overline{\sigma}^{\text{ост}}(z, t + \Delta t) &= \overline{\sigma}_x^{\text{ост}} + \frac{2}{\pi} \Delta t q (F_2 + F_\theta).\end{aligned}\quad (10)$$

Решая многократно данные уравнения, можно найти решения для точек $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{n-1}, t_n$, где $t_i = t_{i-1} + \Delta t$. В момент времени t_i необходимо учесть уравнение (9в).

На рис. I показана зависимость формы остаточных напряжений от скорости полета шарика. Как видно, на кривой условно можно выделить три участка:

- 1) тонкий поверхностный слой растягивающих напряжений, который располагается в приповерхностном слое до глубины 0,04 мм;
- 2) слой сжимающих напряжений располагается в диапазоне от 0,04 до 0,4 - 0,5 мм;
- 3) глубинный слой растягивающих напряжений.

Таким образом, кривая остаточных напряжений имеет форму с четко выраженным подповерхностным максимумом. Такой вид кривой, вообще говоря, характерен для экспериментально полученных эпюр остаточных напряжений.

Как видно из рис. 2 - 4, форма эпюр, полученных при помощи численных расчетов, хорошо совпадает с экспериментом.

Экспериментально показано, что количественные расхождения между экспериментом и расчетом по модели не превышает 15-20%.

Экспериментальные исследования остаточных напряжений выполнялись по методу Давиденкова; в работе выполнена модификация формулы Давиденкова на случай локального упрочнения контрольной пластины. Для определения остаточных напряжений в тонком поверхностном слое применялся метод пенетрации, базирующийся на использовании лазерной интерферометрии.

Зависимости величин прогибов контрольных пластин в зависимости от скорости шариков и времени обработки, определенные по математической модели и экспериментально, дают хорошую сходимость результатов (рис. 5, 6).

Результаты расчета остаточных напряжений

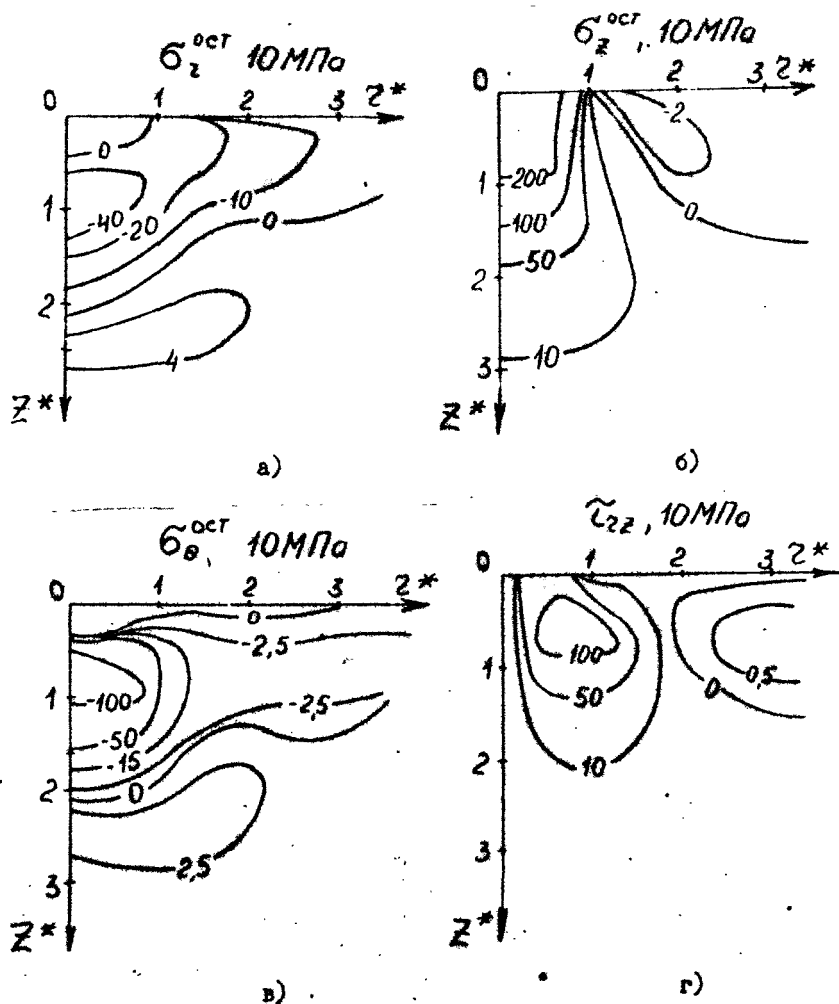


Рис. I.

$G_T = 1560 \text{ МПа}$; $V = 7,5 \text{ м/с}$; $R = 1,25 \text{ мм}$

Зависимость остаточных напряжений
от скорости шариков

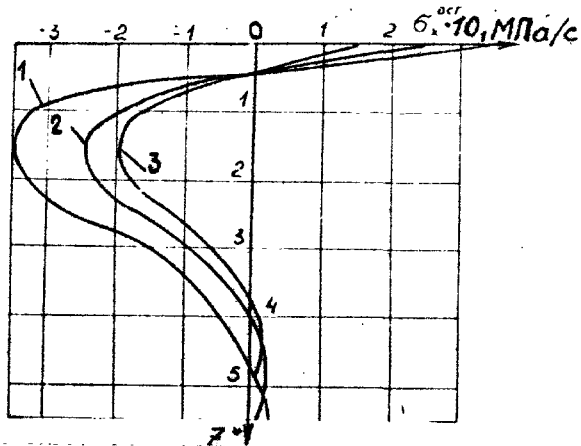


Рис.2

1 - $V = 10 \text{ м/с}$; 2 - $V = 7,5 \text{ м/с}$; 3 - $V = 6,2 \text{ м/с}$

Зависимость остаточных напряжений
от предела текучести материала

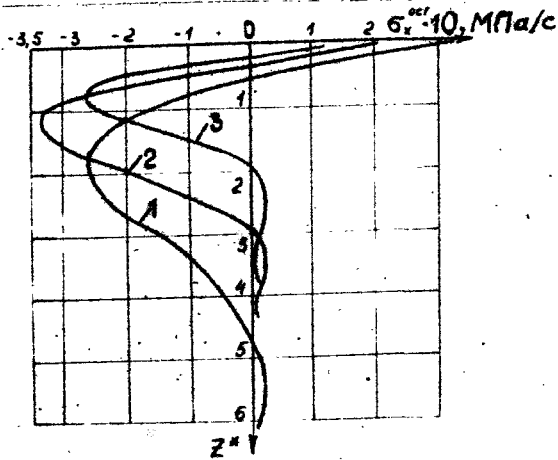


Рис.3

1 - $\sigma_T = 560 \text{ МПа}$; 2 - $\sigma_T = 1090 \text{ МПа}$; 3 - $\sigma_T = 1560 \text{ МПа}$;
 $V = 7,5 \text{ м/с}$; $R = -1,25 \text{ мм}$

Зависимость остаточных напряжений
от времени упрочнения

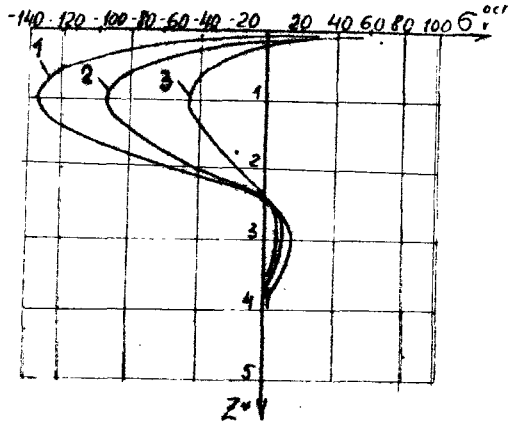


Рис. 4

1 - $t = 72$ с; 2 - $t = 48$ с; 3 - $t = 24$ с

Зависимость прогиба пластин
от скорости шариков

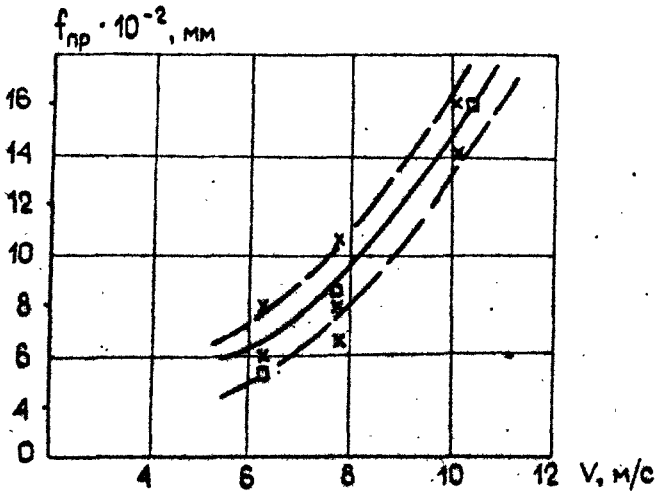


Рис. 5

$R = 1,25$ мм; $\sigma_T = 500$ МПа; $V = 7,5$ м/с; $Q_v = 0,51$ шт./с·мм²
 x - эксперимент; \square - численный расчет; - - - граница интервала разброса значений; — - математическое ожидание

Зависимость прогиба пластин
от времени упрочнения

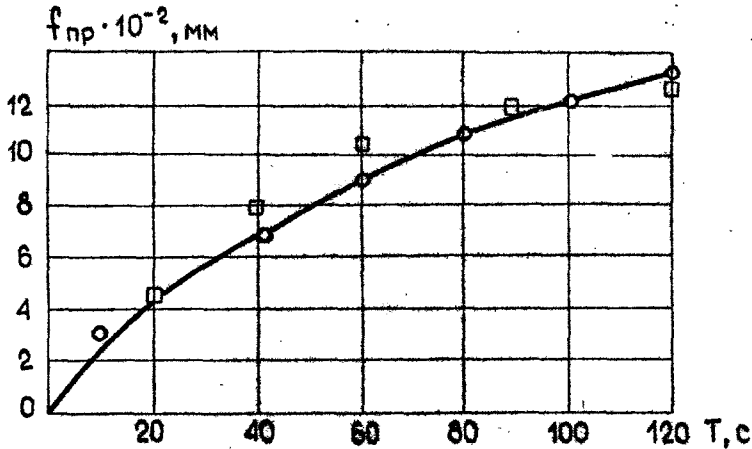


Рис. 6.

□ - эксперимент ; ○ - численный расчет

Анализ численных расчетов показывает, что на остаточные напряжения влияет предел текучести материала: ярко выражен пик сжимающих остаточных напряжений и небольшая глубина их залегания для закаленных материалов и отсутствие ярко выраженного пика с постепенным расширением зоны сжимающих остаточных напряжений для незакаленных материалов. Выше сказанное необходимо учитывать при проектировании процессов упрочнения.

На основании расчетов можно также сделать вывод, что глубина залегания остаточных напряжений преимущественно зависит от свойств материала и кинетической энергии упрочнения и меньше зависит от времени упрочнения.

Наличие тонкой растягивающей зоны на поверхности упрочняемых материалов говорит о наведении дефектного слоя на поверхности. Поэтому для особо ответственных деталей можно рекомендовать снятие поверхностного слоя после процесса упрочнения, например, электрополированием, что может привести к увеличению долговечности упрочненного материала.

5. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГДУ

Из практики известно, что все входные параметры упрочнения имеют значительный разброс значений. В связи с этим любая модель упрочнения должна включать в себя анализ разброса характеристик упрочнения. В общем, можно выделить три группы параметров, влияющих на разброс характеристик упрочнения:

- погрешности, связанные с установкой, на которой производится упрочнение;
- разброс свойств материала;
- погрешности измерения остаточных напряжений.

Каждая из этих групп по своему влияет на процесс и оценку технологических параметров упрочнения. Погрешности, связанные с установкой, можно разбить на три составляющие:

- неравномерность расхода шариков;
- разброс кинетической энергии шариков;
- погрешность времени упрочнения.

Погрешности, связанные со свойствами материала, можно разделить на два типа:

- разброс модуля упругости;
- разброс предела текучести.

Погрешности измерения остаточных напряжений можно также разбить на две группы:

- погрешности измерительного инструмента;
- погрешности параметров образцов.

Предположим, что поведение остаточных напряжений списывается глобальной функцией

$$\sigma(z) = F(q, K, t, E, \sigma_T, z), \quad (II)$$

- где q - расход шариков;
 K - кинетическая энергия шариков;
 t - время упрочнения;
 E - модуль упругости;
 σ_T - предел текучести.

Разложим выражение (II) в ряд Тейлора, тогда получим

$$\Delta\sigma(z) = \frac{\partial\sigma}{\partial q} \Delta q + \frac{\partial\sigma}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial\sigma}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial\sigma}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial\sigma}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T. \quad (12)$$

В работе рассмотрено влияние разброса всех входящих в выражение (12) параметров, то есть определены функции чувствительности величины остаточных напряжений к разбросу расхода шариков, кинетической энергии, свойств обрабатываемого материала и точности измерительных устройств. Выполнена разработка вероятностной математической модели и алгоритма расчета погрешностей прогнозирования остаточных напряжений. Так при исходных данных: давление масла $p = 0,35$ МПа, диаметр шариков $R = 1,25$ мм, время обработки элемента поверхности $t = 60$ с, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности $l = 150$ мм и удельный расход шариков

$$Q_v = 0,51 \text{ шт/с}\cdot\text{мм}^2 \text{ - получим: } \Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t, \Delta Q) = 0,1648 \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t), \\ \text{МПа; } \Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, \Delta K) = \alpha(z) \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t) \cdot 3,66 \cdot 10^{-4}, \text{ МПа; } \\ \Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t) = \gamma(z) \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t) 10,27, \text{ МПа; } \Delta \overline{\sigma}^{\text{изм}} \approx 33 \text{ МПа,}$$

где $\Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t, \Delta Q)$, $\Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, \Delta K)$, $\Delta \overline{\sigma}^{\text{зост}}(z, t)$, $\Delta \overline{\sigma}^{\text{изм}}$ - погрешности определения остаточных напряжений, связанные с разбросом соответственно расхода шариков, кинетической энергии, свойств обрабатываемого материала и точности измерительных приборов;

$\alpha(z)$, $\gamma(z)$ - функции чувствительности.

6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОПЕРАЦИИ ГДУ

При определении режимов упрочнения будем исходить из численного решения уравнений (10) с учетом вероятностной модели. Для этого представим начальное и конечное состояние технологических параметров обрабатываемой детали в виде вектора

$$\Phi_0 = \Phi_0(\overline{\sigma}_{ij0}^{\text{ост}}, \sigma_{\text{то}}, E, \mu); \\ \Phi_1 = \Phi_1(\overline{\sigma}_{ij1}^{\text{ост}}, \sigma_{\text{т1}}, E, \mu); \quad (13)$$

а эффект упрочнения - в виде оператора упрочнения

$$\hat{A} = \hat{A}(E_{\text{ш}}, q, t), \quad (14)$$

где $E_{\text{ш}}$ - кинетическая энергия шарика;

q - расход шариков на единицу поверхности;

t - время упрочнения.

Тогда сам процесс упрочнения после преобразований можно представить в виде выражения

$$\hat{A} \Phi_0 = \Phi_1. \quad (15)$$

Прогнозирование остаточных напряжений можно представить в виде двух этапов, первый из которых может быть опущен, если в технических требованиях на деталь не оговорены жесткие допуски на параметры распределения остаточных напряжений.

Первый этап является предварительным и заключается в определении требуемых характеристик материала:

σ_T - предела текучести;

$\Delta \sigma_T$ - среднего отклонения предела текучести;

R_a - шероховатости поверхности;

β - коэффициента упрочнения материала.

На втором этапе сначала необходимо задаться технологическими параметрами упрочнения:

$h_{сж}$ - глубиной сжатого слоя;

$\sigma_{\max}^{\text{зост}}$ - максимальными остаточными напряжениями.

Из уравнения (14) определяем численно энергию упрочнения, а из уравнения (13) на основании максимальных сжимающих напряжений аналогично определяем время упрочнения.

Численное решение (15) дает также форму эпюры остаточных напряжений, величину поверхностной зоны растягивающих напряжений, величину растягивающих напряжений, глубину залегания максимальных сжимающих напряжений.

Как видно из рис. 7, ожидаемые технологические параметры упрочнения будут находиться в диапазоне

$$\sigma_{\max}^{\text{зост}} \pm D_{\sigma}^{\max} / 2, \quad h_{сж} \pm D_h^{сж} / 2.$$

Модель упрочнения является квазистатической, поэтому она будет эффективно работать в ограниченном диапазоне скоростей $V = 4 - 12$ м/с, достаточном для практических целей. Кроме того, данная модель неприменима для пластичных материалов с низким пределом текучести, так как в основу численного решения положен метод переменных параметров упругости. Поэтому предел текучести должен удовлетворять неравенству

$$\sigma_T > 350 \text{ МПа.}$$

Лучше всего модель работает для закаленных материалов,

$$\sigma_T = 800 \dots 1600 \text{ МПа.}$$

Эпюра остаточных напряжений

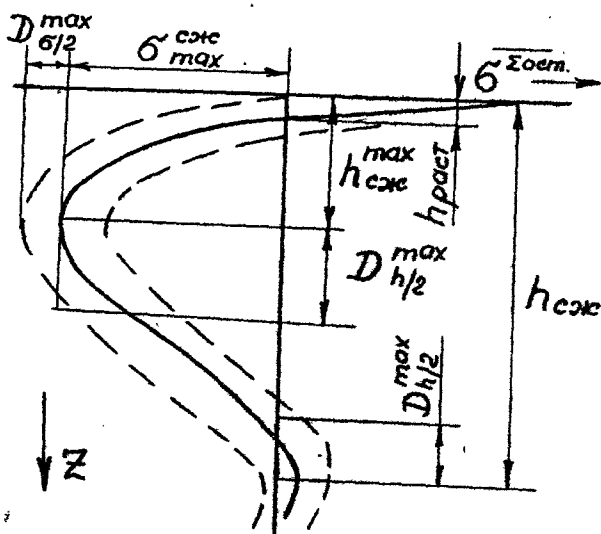


Рис. 7

На основании разработанной методики назначены режимы упрочнения для тяжело нагруженных деталей специальных машин, кранов и тракторов.

Стендовые испытания показали, что долговечность зубчатых колес, лимитируемая изгибными напряжениями, после ГДУ повысилась в 8 - 10 раз по сравнению с исходной. Ресурс по контактной выносливости конической пары повысился на 25% по сравнению с ресурсом деталей, изготовленных по серийной (без ГДУ) технологии. Кроме того был проведен сравнительный анализ эффективности упрочнения ГДУ по сравнению с другими методами (рис. 8).

Анализ показал, что долговечность на изгиб после ГДУ в 1,1 - 1,2 раза выше, чем при упрочнении сухой дробью, в 1,8-2 раза выше, чем при магнитоимпульсном упрочнении. Таким образом, метод ГДУ при правильно назначенных режимах упрочнения является эффективным методом упрочнения деталей машин. Полученные результаты подтверждают возможность практического использования разработанной математической модели.

Для обеспечения внедрения результатов работы разработаны универсальные и специальные установки для ГДУ деталей типа диск (шестерен), конических колес, венцов с внутренним зубом и валов.

Долговечность деталей, упрочненных
различными способами

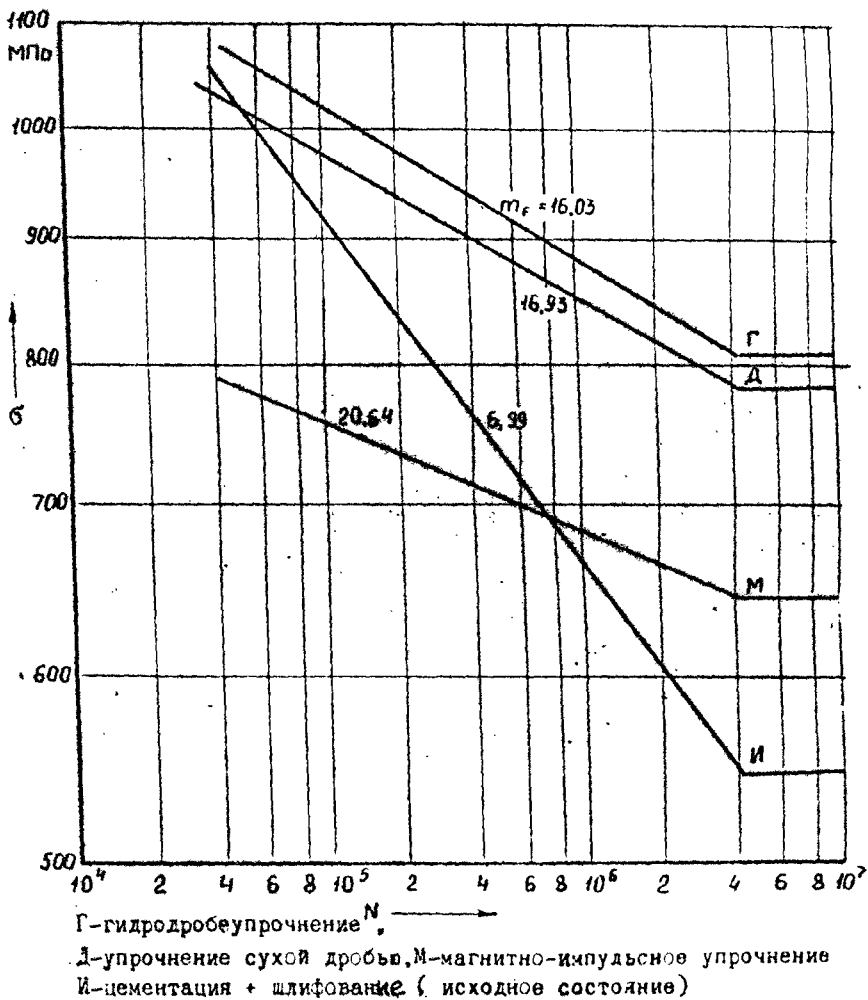


Рис. 8.

В результате внедрения работы получен годовой экономический эффект за счет повышения качества тяжело нагруженных деталей трансмиссий в размере 119490 рублей.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана математическая модель формирования напряженного состояния поверхностных слоев обрабатываемых деталей при гидродробеструйной обработке, учитывающая законы теории упруго-пластического деформирования и теории приспособляемости. Анализ этой модели показал, что она отражает в явном виде физическую связь режимов упрочнения и выходных параметров обработки.

2. Исследование математической модели и экспериментальная проверка показали возможность ее использования для прогнозирования распределения остаточных напряжений и механических свойств в поверхностных слоях обрабатываемых деталей.

3. Численный анализ модели выявил следующие особенности распределения остаточных напряжений при ГДУ:

- форма эпюры остаточных напряжений при упрочнении практически не зависит от времени упрочнения;

- на поверхности упрочненной детали формируется тонкий слой остаточных растягивающих напряжений, что подтверждается ранее выполненными экспериментальными исследованиями;

- с увеличением рабочего давления и диаметра шариков растет как толщина слоя сжимающих напряжений, так и их величина;

- с уменьшением предела текучести материала обрабатываемой детали толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается, а экстремальное значение сжимающих остаточных напряжений уменьшается.

4. Разработанная математическая модель, устанавливающая в явном виде связь между временем упрочнения и остаточными напряжениями, позволяет по заданному распределению остаточных напряжений назначать оптимальное время гидродробеструйной обработки. Кроме того, полученная модель может быть использована для прогнозирования остаточных напряжений при других видах дробеобработки, чеканке, других способах поверхностного пластического деформирования, связанных с дискретным воздействием рабочей среды на обрабатываемую поверхность.

5. Разработана вероятностная модель оценки чувствительности выходных технологических параметров к разбросу входных параметров процесса, что позволяет использовать математическую модель при проектировании операции ГДУ в технологических процессах машиностроительного производства.

6. Натурные испытания упрочненных деталей показали эффективность практического использования результатов работы: долговеч-

ность на изгиб повысилась в 8...10 раз, контактная долговечность - на 25...37%. Лодовые испытания подтвердили повышение ресурса узлов с упрочненными деталями.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кастерин А.В., Мазеин П.Г. Расчетное определение остаточных напряжения при гидродробеструйной обработке // Интенсификация производства и повышения качества изделий поверхностным пластическим деформированием: Тезисы докл. науч.-техн. конф. - Тольятти: Ваз, 1989. - С. 76.
2. Мазеин П.Г., Спиридонов Е.К., Кастерин А.В. Спределение характеристик эжекторов установок для гидродробеструйного упрочнения. - Челябинск: ЧПИ, 1989. - 7 с. - деп. в ВНИИТЭМР, №260-мш89.
3. Мазеин П.Г., Кастерин А.В. Прогнозирование полей напряжений в деталях методом конечных элементов // Математическое обеспечение систем с машинной графикой. - Ижевск-Тюмень: Тез. докл. науч. -техн. семинара - ИДТ, 1990. - С. 91-92.
4. Мазеин П.Г., Кастерин А.В., Медведов С.В. Гидродробеструйное упрочнение в автоматизированном производстве // Инструментальное обеспечение автоматизированных систем механообработки: Тез. докл. регион. науч.-практ. конф. - Иркутск: ИДНТ, 1990. - С. 92.
5. Кастерин А.В. Расчетное определение остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении. Челябинск: ЧИТУ, 1991. - 43 с. - деп. в ВНИИТИ 12.02.91, № 717-В91.
6. Кастерин А.В., Мазеин П.Г., Медведов С.В. Взаимосвязь режимов и остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке // Остаточные напряжения - резерв прочности в машиностроении: Тез. докл. всесоюзной науч.-техн. конф. - Ростов-на-Дону: РАСХМ, 1991. - С. 49.
7. Мазеин П.Г., Столяров В.С., Кастерин А.В. Особенности проектирования установок для гидродробеструйного упрочнения // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ, 1991, с. 31-34.
8. Мазеин П.Г., Кастерин А.В., Лучков М.Г., Макарова В.П. Гидродробеструйное упрочнение тяжело нагруженных деталей // Прогрессивная технология упрочнения деталей методами ППД: Тез. семинара - Л.: ВНИИТИ, 1991. - С. 24-26.

Подписано к печати 17.02.93. Формат 60X90 1/16. Печ. л. 1,25.
Уч.-изд.л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 35/80.

УОП ЧГТУ. 454063, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.