

---

## Оптимизация технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки с учетом их надежности

*Д. В. Казаков, А. С. Шведова*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье рассмотрены результаты исследований повышения надежности технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки (ОУ ЦРО). Предметом исследования является процесс формирования надежности технологических процессов ОУ ЦРО, обеспечивающийся рациональным сочетанием технологических режимов и характеристик рабочей среды. Задачей исследования является повышение эффективности и надежности технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки с учетом регулируемых факторов на основании разработки комплекса адекватных теоретических моделей процесса обработки. Получены уточненные теоретические модели формирования характеристик поверхностного слоя обработанных деталей: глубины и степени упрочнения. Разработана методика аналитического прогнозирования надежности технологических процессов отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки с использованием следующих показателей: коэффициент мгновенного рассеивания контролируемого параметра, коэффициент смещения контролируемого параметра и коэффициент запаса точности технологического процесса. Установлено, что технологический процесс ОУ ЦРО обеспечивает получение требуемых параметров качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей в пределах величины поля допуска в определенном интервале изменения технологических режимов и характеристик.

**Ключевые слова:** центробежно-ротационная обработка, глубина упрочненного слоя, степень упрочнения, надежность технологического процесса, методика обеспечения надежности.

В современном машиностроении предъявляется высокий уровень требований к качеству и долговечности изготавливаемых деталей. Основной задачей технологов является - изготовление конкурентоспособного изделия с требуемым набором качественных характеристик, способного долгое время выполнять свое функциональное назначение без текущего и капитального ремонтов [1]. Использование методов упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет эффективно решать поставленную задачу. Этот процесс представляет собой сложную систему, где вопросы надежности приобретают большое значение. В промышленном

производстве имеют особую значимость проблемы обеспечения надежности сопряженные с целью достижения необходимого качества обрабатываемых деталей и высокой производительности производственного процесса, связанной с ограниченностью ресурсов и уменьшением затрат на эти ресурсы. Особую ценность имеют решения проблем обеспечения надежности в промышленном производстве, где задача достижения требуемого качества изделий и производительности производственного процесса сопряжена с ограниченностью ресурсов и необходимостью минимизации их затрат.

Технологический процесс (ТП) - это сложная динамическая система, которая должна обладать высокой надежностью. Под надежностью ТП понимают свойство ТП, обеспечивающее требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах, при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах.

Большой вклад в развитие ОУ ЦРО и динамических методов обработки ППД, повышение надежности технологических процессов и оборудования внесли работы таких ученых, как: Бабичева А.П. [2], Тамаркина М.А [3], Рыжкина А.А [4], Трилисского В.О [5], Андросова А.А, Григорьяна Г.Т, Дубровского П.В [6], Тищенко Э.Э [7], Королькова Ю.В [8, 9] и др.

Анализ работ вышеуказанных авторов позволяет сделать вывод о том, что результаты, представленные исследователями, дают недостаточно полное описание процесса центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков, не представлена оценка надежности ТП при обработке поверхностным пластическим деформированием, не приведены примеры расчетов надежности технологического процесса и влияния формирующихся отказов.

Сущность метода ОУ ЦРО состоит в том, что необходимый объем гибкой обрабатывающей среды (стальные полированные шарики или

фарфоровые шарики и т.д.) и детали заполняют рабочую камеру, конструкция которой состоит из неподвижной цилиндрической вертикально расположенной обечайки и прилегающего к ней вращающегося дна. Вращаясь вокруг вертикальной оси, среда и детали, которые в совокупности составляют массу загрузки, приобретают форму тора. Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка. На рисунке 1 представлена схема ОУ ЦРО.

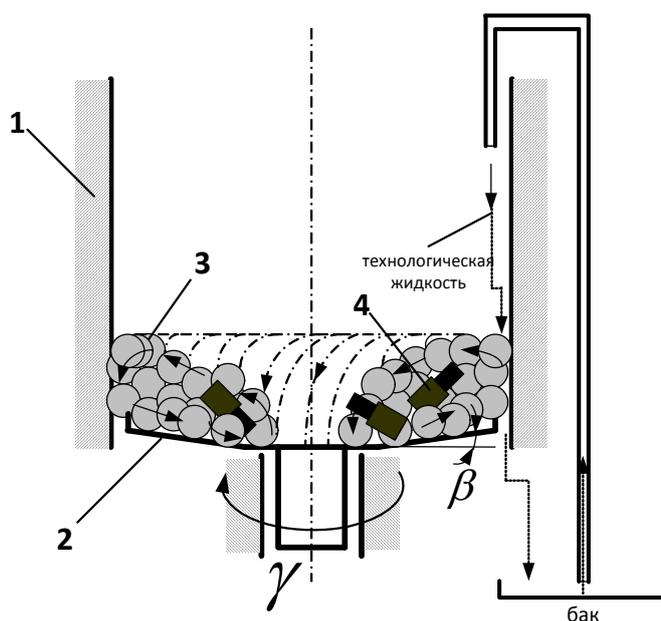


Рис. 1. - Схема процесса ОУ ЦРО (1 – рабочая камера, 2 – дно рабочей камеры; 3 – рабочая среда; 4 – обрабатываемые детали).

При проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки, одной из основных задач является аналитический расчет ожидаемой степени упрочнения и глубины упрочненного слоя.

При внедрении шарика в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток) вокруг которой всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину. Глубина упрочнения  $h_n$  способна влиять на многие эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей, например такие, как:

износостойкость, контактная жесткость, усталостная долговечность. Одной из наиболее сложных задач является аналитическое определение глубины упрочненного слоя и степени упрочнения в зависимости от параметров процесса обработки и физико-механических свойств материала детали. Существующие на сегодняшний день математические зависимости, полученные несколькими авторами, были выведены на основе теории упругости или пластичности после принятия многочисленных допущений и упрощений [10].

Большое количество исследований, имеющих большое значение, в этой области проведены И.В. Кудрявцевым [11], С.Т. Хейфецем, В.П. Пшибыльским [13], Д.Д. Папшевым, М.С. Дроздом [14], В.М. Браславский и др. На основании результатов исследований представленных авторов и исследований, проводимых в ДГТУ, была получена зависимость для определения глубины упрочненного слоя  $h_n$ :

$$h_n = 9,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{a \cdot b \cdot \rho_{ш}}{k_s \cdot c \cdot \sigma_T}} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot \gamma \cdot R_{эф} \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – полуоси эллипса контакта;  $\rho_{ш}$  - плотность материала шарика;  $k_s$  - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта;  $c$  – коэффициент несущей способности контактной поверхности;  $\sigma_T$  - предел текучести материала детали;  $R$ - радиус шарика;  $\alpha$  - угол встречи шарика с поверхностью детали;  $k_{эф}$  - коэффициент эффективной скорости;  $\gamma$  – угловая скорость вращения дна (ротора);  $R_{эф}$  – эффективный радиус вращающегося дна (ротора).

Согласно [12] под степенью упрочнения  $\varepsilon$  условно принимается отношение диаметра остающейся от вдавливания лунки  $d$  к диаметру вдавливаемой сферы  $D$ .

$$\varepsilon = \frac{d}{D} \quad (2)$$

Учитывая зависимости, полученные в работе [14], можно записать для случая вдавливания индентора в деформированное полупространство:

$$d = \left( \frac{D \cdot E_y}{0,1 \cdot HD} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

где  $E_y$  - энергия удара индентора,  $HD$  - динамическая твердость материала [14].

Для ЦРО:

$$E_y = \frac{m_{ш} \cdot V_{эф}^2}{2} \quad (4)$$

где  $m_{ш}$  - масса шарика;  $V_{эф}$  – скорость соударения шарика с поверхностью детали:

$$V_{эф} = k_{эф} \cdot \gamma \cdot R_{эф} \quad (6)$$

Учитывая (6), а так же то, что  $H_D = 1,7HB$  [14], после преобразований получим следующую зависимость:

$$\varepsilon = 2,03 \cdot \sqrt[4]{\frac{R^2 \cdot \gamma^2 \cdot \rho_{ш}}{HB}} \quad (7)$$

где  $HB$  – твердость материала детали по Бринелю.

Для проверки полученных теоретических зависимостей проведены комплексные экспериментальные исследования процесса ОУ ЦРО. Для проведения экспериментов использовался станок ЦРС-7. Обработка в среде стальных шаров производилась «внавал». В качестве образцов для экспериментальных исследований применялись металлы с различным пределом текучести такие, как сталь 45 и алюминиевый сплав Д16Т.

На рисунках 2-3 представлены результаты проверки полученных теоретических зависимостей изменения степени и глубины упрочнения

поверхности детали при ОУ ЦРО. Установлена адекватность предложенных теоретических зависимостей, влияния технологических параметров процесса на степень и глубину упрочнения поверхности детали. Расхождение экспериментальных данных и теоретических не превышает 20%.

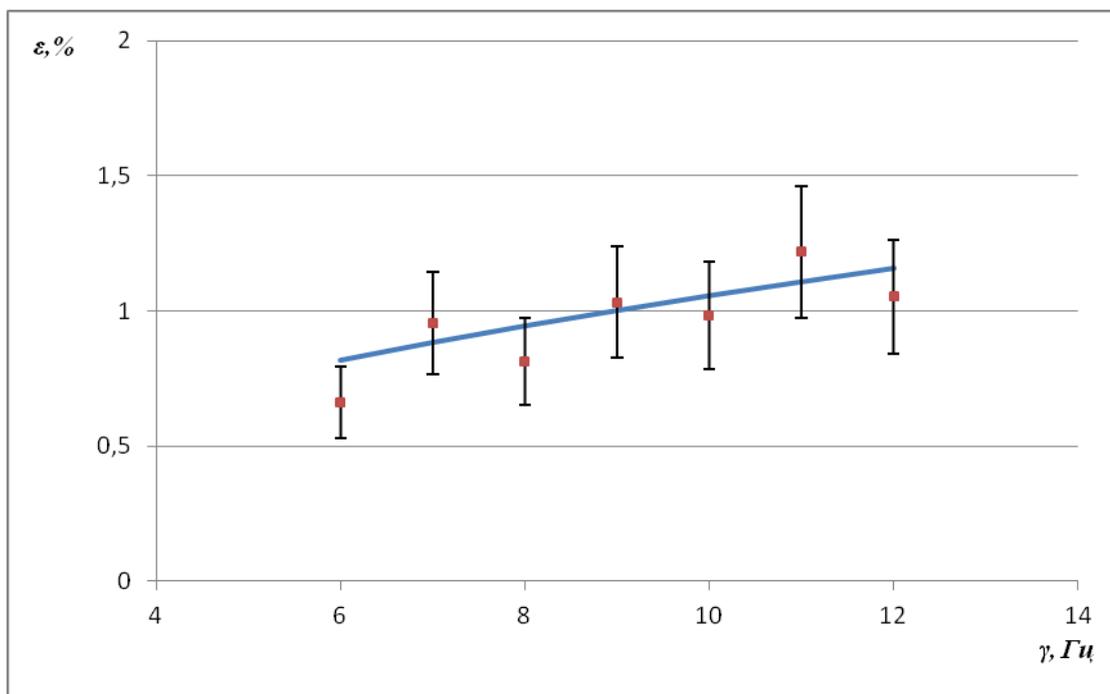


Рис. 2. - Зависимость изменения степени  $\varepsilon$  упрочнения поверхности детали от частоты вращения дна камеры (ротора)  $\gamma$ : — - теоретические данные, ■ - данные экспериментальных исследований.

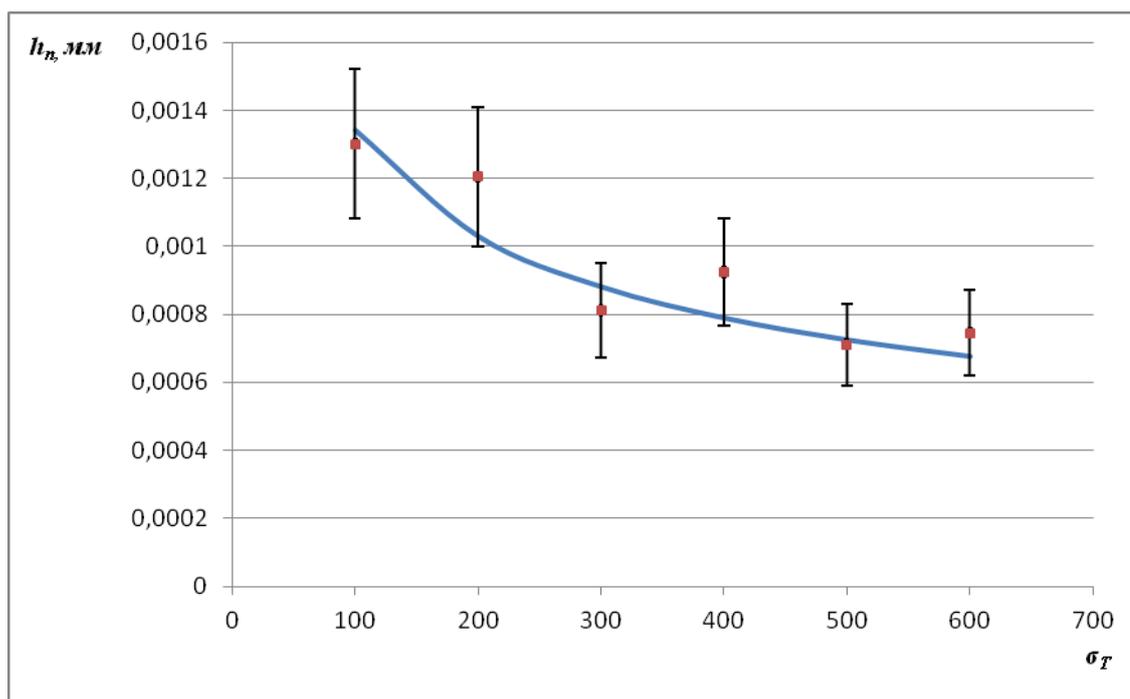


Рис. 3. - Зависимость изменения глубины упрочненного слоя поверхности детали  $h_n$  от предела текучести материала  $\sigma_T$ , МПа: — - теоретические данные, ■ - данные экспериментальных исследований.

В ходе теоретических исследований процесса центробежно-ротационной обработки в среде стальных шаров как объекта управления, определены параметры, характеризующие входные и выходные переменные процесса и параметры, характеризующие условия реализации технологического процесса. Доминирующими факторами, оказывающими наиболее сильное воздействие на выходные переменные объекта управления, являются:

- факторы, связанные с физико-механическими свойствами заготовкой (коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, предел текучести, жесткость);
- режимы ЦРО (объем загрузки рабочей камеры, частота вращения дна рабочей камеры (ротора), объем технологической жидкости, подаваемой в рабочую камеру);
- характеристики рабочей среды (диаметры шаров);

- человеческий фактор.

Регулируя технологический процесс с помощью управляемых доминирующих факторов, можно добиться требуемых параметров качества деталей при условии повышения надежности технологического процесса [15].

Оценка технологического процесса может быть выполнена на уровне конкретных технологических процессов либо на уровне отдельной технологической операции.

1. Анализ технологического процесса проводят, применяя показатели [9, 15, (ГОСТ 27.202-83)]:

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_T = \frac{\omega_p}{T} \quad (8)$$

где  $\omega_p$  - поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время;

$T$  - допуск на контролируемый параметр.

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру)

$$K_p(\tau) = \frac{\omega_p(\tau)}{T} \quad (9)$$

где  $\omega_p(\tau)$  - поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени  $\tau$ .

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{cm}(\tau) = \frac{\bar{\Delta}(\tau)}{T} \quad (10)$$

где  $\bar{\Delta}(\tau)$  - среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени  $\tau$ ,

$$\bar{\Delta}(\tau) = \left| \bar{y}(\tau) - y_0 \right| \quad (11)$$

где  $\bar{y}(\tau)$  - среднее значение контролируемого параметра;  $y_0$  - значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение  $y_0$ , совпадает с номинальным значением параметра  $y_{\text{ном}}$ ).

#### 4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_z(\tau) = 0,5 - K_{cm}(\tau) - 0,5K_p(\tau) \quad (12)$$

Для обеспечения надежности ТП должно выполняться условие:

$$K_z(\tau) > 0 \quad (13)$$

На основании представленных зависимостей были проведены расчеты параметров надежности ТП при возможном разбросе частоты вращения ротора  $\gamma$  в пределах 5-10-15 процентов и возможном разбросе диаметров стальных шаров в пределах 5-10-15 процентов при обработке деталей из различных материалов (сталь 45 и Д16Т). Некоторые результаты представлены на рисунках 4-5 [16].

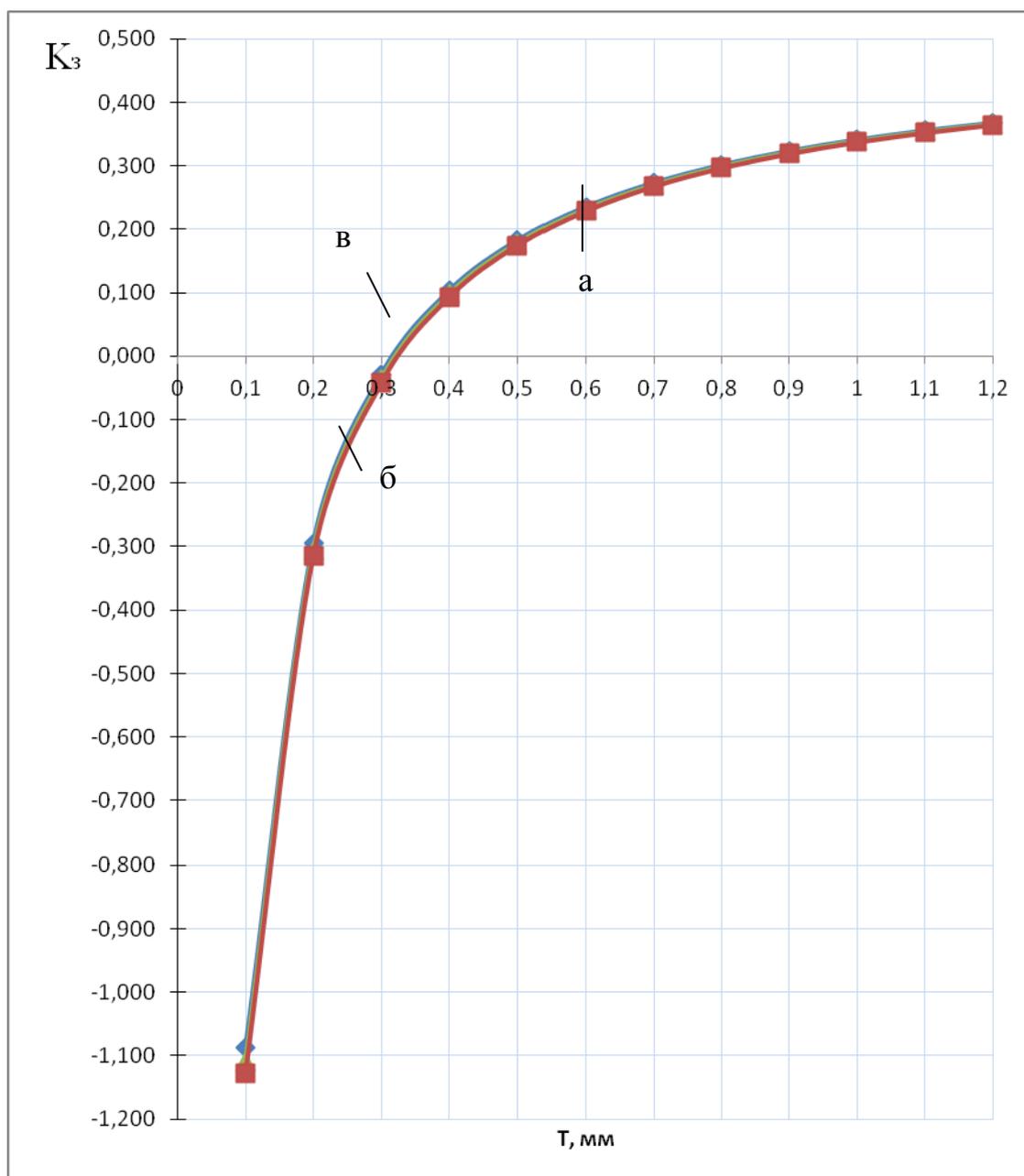


Рис. 4. - Влияние величины допуска  $T$  0,1 – 1,2 мм с шагом 0,1мм, изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора  $\gamma$  на надежность ТП ЦРО в среде стальных шаров диаметром 4мм. Частота вращения ротора  $\gamma=6, 9, 12$  Гц с разбросом  $\gamma=5\%$ . Материал Сталь 45. Контролируемый параметр – глубина упрочнения  $h_n$ : а)  $\gamma=6$  Гц, б)  $\gamma=9$  Гц, в)  $\gamma=12$  Гц

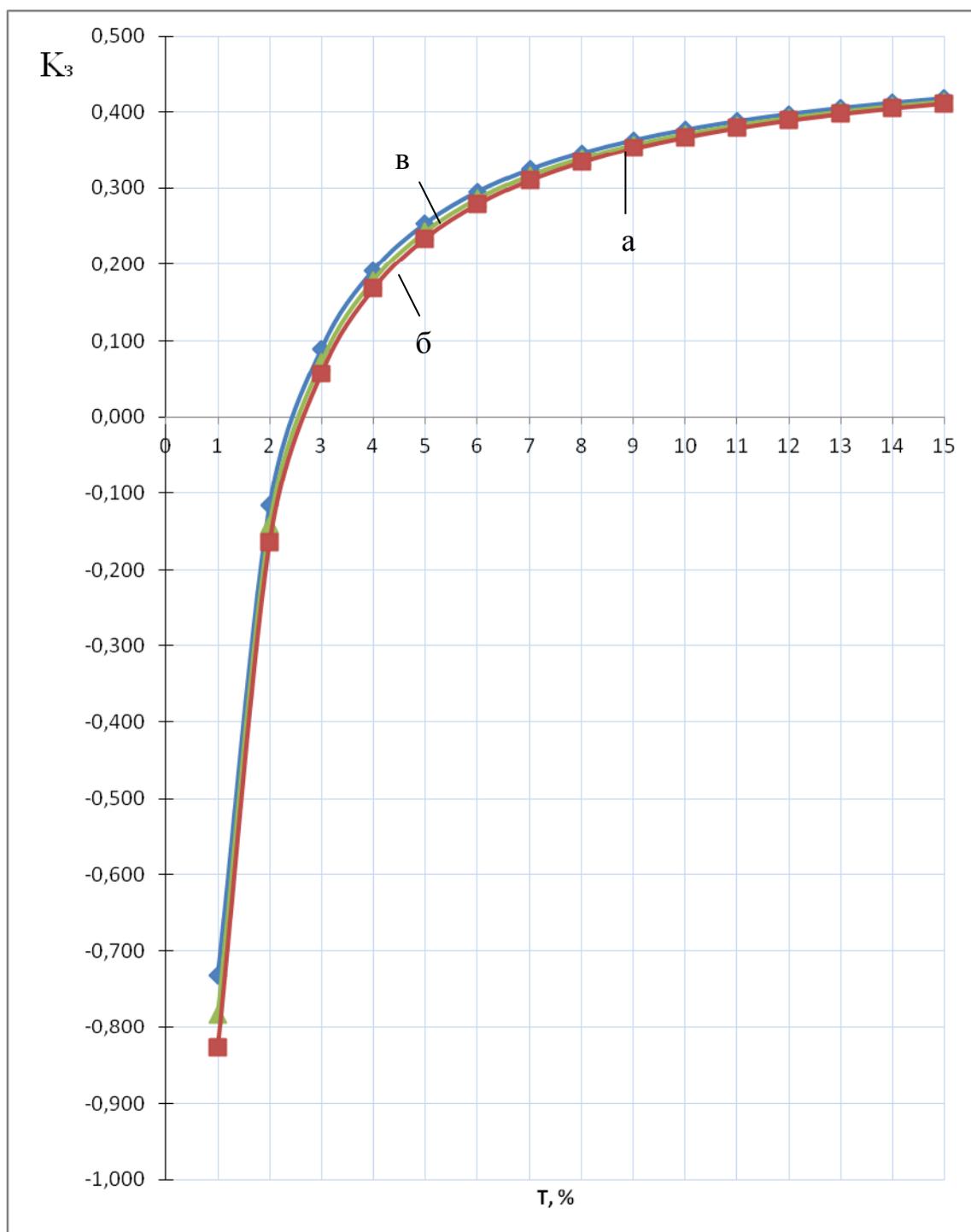


Рис. 5. - Влияние величины допуска  $T$  0,1 – 1,2 мм с шагом 0,1мм, изменения диапазона регулирования частоты вращения ротора  $\gamma$  на надежность ТП ЦРО в среде стальных шаров диаметром 4, 6 и 8 мм. Частота вращения ротора  $\gamma=6, 9, 12$  Гц с разбросом  $\gamma=5\%$ . Материал сталь 45. Контролируемый параметр – степень упрочнения  $\varepsilon$ : а)  $\gamma=6$ Гц, б)  $\gamma=9$ Гц, в)  $\gamma=12$ Гц

На рисунке 6 представлена блок-схема процесса оптимизации ОУ

ЦРО. В качестве исходных данных, необходимых для начала расчета, вводятся: массив характеристик рабочей среды, допусков, частот вращения дна (ротора) рабочей камеры, задается материал детали.

С учетом заданных условий, производится расчет минимального и максимального значений глубины упрочненного слоя обрабатываемой детали.

На следующем этапе работы алгоритма рассчитываются показатели надежности технологического процесса по формулам, представленным выше. При этом происходит проверка условия  $K_3(\tau) > 0$ . Если условие выполняется, то производится фиксация следующих значений: заданная глубина упрочненного слоя, предел текучести материала обрабатываемой детали, коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости, диаметр шарика среды, частота вращения дна (ротора) рабочей камеры, величина поля допуска. После того, как значения были зафиксированы, продолжается цикл расчетов по всему массиву исходных данных. После окончания расчетов производится определение минимального времени обработки, при котором обеспечивается надежность ТП ОУ ЦРО и данная комбинация исходных данных считается оптимальной. Если условие  $K_3(\tau) > 0$  не выполняется, то необходимо ввести поправки в исходные данные расчета.

В конце работы программы на экран выводятся параметры: заданная глубина упрочненного слоя, предел текучести материала обрабатываемой детали, коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости, диаметр шарика среды, частота вращения дна (ротора) рабочей камеры, величина поля допуска, минимальное время обработки.

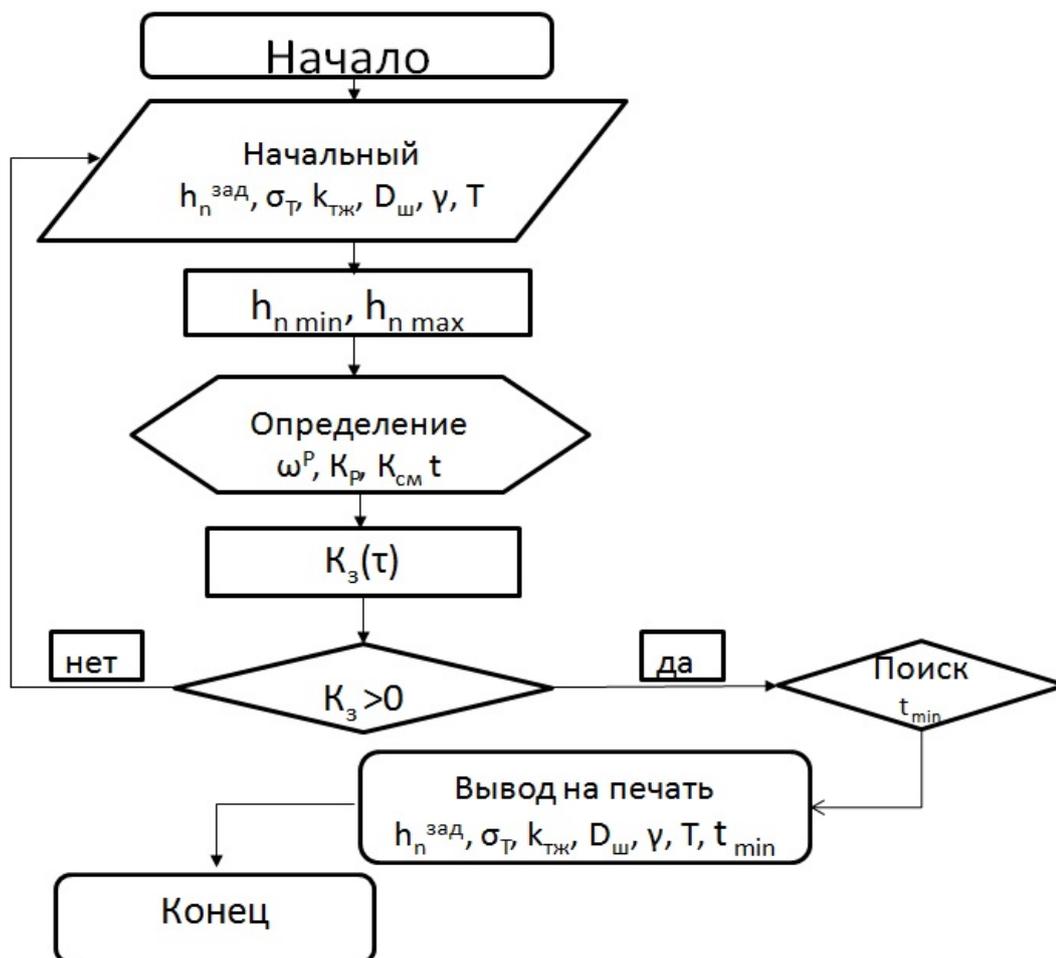


Рис. 6. - Блок-схема алгоритма оптимизации процесса ОУ ЦРО.

Далее представлен пример расчета, проведенного по описанному алгоритму.

#### Исходные данные:

Материал детали - сталь 45; обрабатывающая среда – стальные шары диаметром 8 мм;  $h_n^{зад}=1,5$  мм; величина поля допуска –  $T=0,2$  мм; частота вращения ротора 6 Гц с разбросом 5% .

Получаем следующие минимальные и максимальные значения параметров глубины упрочнения обработанной поверхности в зависимости от разброса частоты вращения дна (ротора) рабочей камеры:  $h_n^{min} = 0,865$  мм;  $h_n^{max} = 0,934$  мм.

Исходя из этого, определим поле рассеивания  $\omega^P(\tau)$ , в зависимости от разброса частоты вращения ротора:

$$\omega^P(\tau) = h_n^{max} - h_n^{min} = 0,069 \text{ мм}$$

Согласно (9) произведем расчет коэффициента мгновенного рассеивания  $K_p(\tau)$  и получим:

$$K_p(\tau) = 0,345$$

Согласно (10) и (11) получаем значение коэффициента смещения (контролируемого параметра)  $K_{cm}(\tau)$

$$K_{cm}(\tau) = 3,0025$$

Согласно (12) находим значение коэффициента запаса точности (по контролируемому параметру)  $K_z(\tau)$

$$K_z(\tau) = -2,675$$

При частоте вращения ротора 6 Гц коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)  $K_z(\tau)$  отрицателен, условие  $K_z(\tau) > 0$  не выполняется, что говорит о том, что технологический процесс ненадежен и требует корректировки.

Согласно зависимости (1) внесем корректировку в ТП для увеличения среднего значения полученной глубины упрочнения обрабатываемой поверхности. Для этого увеличим частоту вращения ротора с 6 до 12 Гц.

Произведя необходимые расчеты, получим значение коэффициента запаса точности (по контролируемому параметру)  $K_z(\tau) = 0,07$

При частоте вращения 12 Гц, коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)  $K_z(\tau)$  положителен, условие  $K_z(\tau) > 0$  выполняется. Таким образом, обеспечивается требуемая надежность технологического процесса.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что методика аналитического прогнозирования позволяет обеспечить надежность ТП, при котором гарантируется получение требуемых параметров качества поверхности детали в ходе обработки в пределах величины поля допуска в определенном интервале изменения технологических режимов и характеристик рабочих сред.

## Литература

1. Вилинов И. Е., Чукарин А. Н., Богуславский И. В. Закономерности формирования спектров шума в кабинах мостовых // Инженерный вестник Дона, 2009, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2009/157.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д: Изд. Центр ДГТУ, 1999 – 621 с.
3. Тamarкин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис... докт. техн. наук / М.А.Тамаркин. – Ростов-на-Дону, 1995 г. – 179 с.
4. Рыжкин А. А., Слюсарь Б. Н. Шучев К. Г. Основы теории надежности. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2002. - 182 с.
5. Трилиссский В.О. , Бурштейн И.Е., Алферов В.И. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей: Обзор. – М.: НИИмаш, 1983 г. – 53 с.
6. Дубровский П.В. Обеспечение надежности технологических процессов: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000 г. – 124 с.
7. Тищенко Э.Э. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки: дис... канд. техн. наук – Ростов-на-Дону, 2004 – 152 с.
8. Корольков Ю.В. Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива: Дис. канд. техн. наук– Ростов-на-Дону, 2011 – 186 с.
9. Корольков Ю.В. Обеспечение надежности технологических процессов центробежно-ротационной обработки свободным абразивом // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 11, № 8(59), вып. 1 – С. 1249 – 1251.
10. Strain hardening exponents and strength coefficients for aeroengine isotopic metallic materials – a reverse engineering approach. / R. Rajendran, C.V.Raman Nagar // Gas Turbine Research Establishment – 2014 – pp. 1 – 2.

11. Кудрявцев И.В. и др. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970, - 144с.
12. Пшебыльский В.П. Технология поверхностной пластической обработки. – М.: Металлургия, 1991 – 476 с.
13. Дрозд М.С. Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
14. Дубровский П.В. Обеспечение надежности технологических процессов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 124 с.
15. Gillespie Laroux. “Deburring and Edge Finishing” Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999. – 404 p.
16. Шведова А. С., Казаков Д. В., Обеспечение надежности технологического процесса центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки // Инженерный вестник Дона, 2014, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2616.

### References

1. Vilinov I. E., Chukarin A. N., Boguslavskij I. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2009, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2009/157.
2. Babichev A.P., Babichev I.A. Osnovy vibracionnoj tehnologii [The basics of vibration technology]. Rostov n/D: Izd. Centr DGTU, 1999. 621 p.
3. Tamarkin M.A. Teoreticheskie osnovy optimizacii processov obrabotki detalej svobodnymi abrazivami. Dis... dokt. tehn. nauk. M.A.Tamarkin. Rostov-na-Donu, 1995 g. 179 p.
4. Ryzhkin A. A., Sljusar' B. N., Shuchev K. G. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of reliability theory]. Rostov-na-Donu: Izdatel'skij centr DGTU, 2002. 182 p.



5. Trilisskij V.O. Burshtejn I.E., Alferov V.I. Ob#emnaja centrobezhno-rotacionnaja obrabotka detalej: Obzor [Volume centrifugal rotary process details: Overview]. V.O. Trilisskij. M.: NIImash, 1983 g. 53 p.
6. Dubrovskij P.V. Obespechenie nadezhnosti tehnologicheskikh processov: Uchebnoe posobie [Ensuring reliability of technological processes: a tutorial]. Ul'janovsk: UIGTU, 2000 g. 124 p.
7. Tishhenko Je.Je. Povyshenie jeffektivnosti otdelochno-uprochnjajushhej centrobezhno-rotacionnoj obrabotki: dis... kand. tehn. nauk. Rostov-na-Donu, 2004. 152 p.
8. Korol'kov Ju.V. Povyshenie nadezhnosti tehnologicheskogo processa centrobezhno-rotacionnoj obrabotki v srede abraziva: Dis. kand. tehn. nauk. Rostov-na-Donu, 2011. 186 p.
9. Korol'kov Ju.V. Vestnik Don. gos. tehn. un-ta. 2011. T. 11, № 8(59), vyp. 1 pp. 1249 – 1251.
10. Strain hardening exponents and strength coefficients for aeroengine isotopic metallic materials – a reverse engineering approach. R. Rajendran, C.V.Raman Nagar. Gas Turbine Research Establishment. 2014. pp. 1 – 2.
11. Kudrjavcev I.V. i dr. Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti krupnyh detalej mashin poverhnostnym naklepom [To increase the strength and durability of large machine parts by surface hardening]. M. NIIFORMTJaZhMASH, 1970. 144p.
12. Pshebyl'skij V.P. Tehnologija poverhnostnoj plasticheskoj obrabotki [The technology of surface plastic processing]. M.: Metallurgija, 1991. 476 p.
13. Drozd M.S., Matlin M.M., Sidjakin Ju.I. Inzhenernye raschjoty uprugoplasticheskoj kontaktnoj deformacii. M.S. DrozdM.: Mashinostroenie, 1986. 224 p.
14. Dubrovskij P.V. Obespechenie nadezhnosti tehnologicheskikh processov. Ul'janovsk: UIGTU, 2000. 124 p.
15. Gillespie Laroux. “Deburring and Edge Finishing” Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999. 404 p.



16. Shvedova A. S., Kazakov D. V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4,  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2616](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2616).