

УДК 622.33.39

**М. А. Тамаркин**, д – р техн. наук, проф., **Э. Э. Тищенко**,  
**Р. В. Гребенкин**, **С. А. Новокрещенов**

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тел. (863)2738725; E-mail: [tehn\\_rostov@mail.ru](mailto:tehn_rostov@mail.ru)

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ППД НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

*В статье представлены результаты исследования процесса вибрирующей обработки деталей в среде стальных шариков. Полученный набор моделей формирования показателей надежности технологического процесса, позволяющий обеспечить повышение эффективности и достижение заданной ценности и стабильности параметров качества заготовки. Зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины закаленного слоя и степени упрочнения. Разработка методологических основ надежности*

**Ключевые слова:** вибрационная отделочная обработка деталей, надежность процесса

### **PROVIDING RELIABILITY OF DYNAMIC METHODS OF PPE ON THE EXAMPLE OF FINISHING-SIMPLIFYING VIBRATION TREATMENT**

*The article presents the results of research of process of vibrating processing of details in the medium of steel balls. The resulting set of models of formation of indicators of reliability of the technological process, allowing to provide increase of efficiency and achievement of a predetermined value and stability of the quality parameters of the workpiece. Dependences for definition of average arithmetic deviation of roughness profile of the surface, the depth of the hardened layer and the degree of hardening. Developing methodological foundations for the reliability.*

**Keywords:** vibratory finishing-strengthening processing of parts, process reliability

Обеспечения надежности технологических систем и осуществляемых ими процессов является важным аспектом технологической подготовки современного машиностроительного производства. Современные технологические системы - сложные объекты, в которых в едином комплексе взаимосвязаны оборудование, инструменты, обрабатываемые заготовки, средства технического обслуживания, вспомогательные и транспортные устройства. При разработке любого технологического процесса в основе лежит, как правило, необходимость обеспечить как требуемый уровень качества, так и высокую производительность при наименьшей себестоимости продукции. При этом повышение производительности технологического процесса может привести к снижению качества или, наоборот, более высокое качество может быть получено за счет низкой производительности, т.е. эти две стороны часто вступают в противоречие друг с другом.

Исследованию вопросов обеспечения надежности процессов создания машиностроительных изделий посвящено значительное количество работ [1,3 и др.]. В них изложены вопросы выбора и оценки эффективности технологических решений, математические методы анализа надежности, способы её оценки, а также методы планирования управляющих воздействий на технологический процесс. Под надежностью технологического процесса (ТП) понимают его свойство обеспечивать 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 [3]. Исследования надежности технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов регламентируются ГОСТ

27.202-83 [2], согласно которому при контроле технологического процесса по рассеянию размеров после обработки поверхности детали определяют значения показателей точности.

Настоящее исследование посвящено обеспечению надежности одного из динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием – вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в среде стальных шариков (ВиОУО). ВиОУО является одним из наиболее перспективных методов обработки деталей машин и приборов. Он обладает высокой производительностью, имеет большие технологические возможности, достаточно легко подвергается механизации и автоматизации. ВиОУО применяется на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.). Оценку надежности ВиОУО будем производить по уровням тех показателей и параметров качества продукции, которые непосредственно зависят от технологии изготовления. В процессе анализа надежности при проведении исследований будем исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее описаны в конструкторской документации. Чтобы повысить качество продукции следует повысить требования к оборудованию, методам контроля и организации самого технологического процесса ВиОУО.

Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на выходные переменные объекта управления (технологического процесса ВиОУО), являются следующие:

- факторы, связанные с заготовкой, поступающей на обработку (жесткость, твердость, предел текучести, коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании);
- режимы обработки (объем загрузки рабочей камеры, амплитуда и частота колебаний камеры, объем подаваемой технологической жидкости);
- характеристики рабочей среды (диаметры и масса шаров);
- человеческий фактор.

Для анализа надежности технологических процессов (в нашем случае процесса ВиОУО), согласно [2,3] используются коэффициенты надежности технологических процессов механической обработки деталей. При контроле технологических процессов по количественному признаку определены следующие значения показателей точности:

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_T = \frac{\omega^P}{T},$$

где  $\omega^P$  - поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время;  $T$  - допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma,$$

где  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \leq K_{TO} \leq 1,$$

где  $K_{TO}$  - нормативное (предельное, технически обоснованное) значение  $K_T$ .

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру)

$$K_p(\tau) = \frac{\omega^P(\tau)}{T},$$

где  $\omega^P(\tau)$  - поле рассеивания контролируемого параметра в момент времени  $\tau$ .

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{см}(\tau) = \frac{\bar{\Delta}(\tau)}{T},$$

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

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

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  $y_{ном}$ ).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_z(\tau) = 0,5 - K_{см}(\tau) - 0,5K_p(\tau).$$

При контроле точности должно выполняться условие  $K_z(\tau) > 0$ .

Для расчета параметров надежности проектируемых технологических процессов отделочно-упрочняющей вибрационной обработки необходимо прогнозировать рассеяние показателей качества изготавливаемых деталей. Для этого нужно получить теоретические зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины упрочнения и степени деформации.

Авторами были проведены исследования формирования шероховатости обработанной поверхности при ВиОУО. При этом сделаны следующие основные допущения: шар, двигаясь под некоторым углом  $\alpha$  к обрабатываемой поверхности, внедряется и проходит при этом некоторое расстояние по этой поверхности. Образуется отпечаток, который представляет собой часть эллипсоида с полуосями  $a$  и  $b$  большой и малой соответственно. При наложении единичных следов формируется профиль шероховатости поверхности. Для упрощения схемы взаимодействия принято, что диаметры всех шаров одинаковы. При этом учитывается только скольжение шара по поверхности при внедрении. Возможное перекачивание исключается. Анализируется только среднее вероятностное значение различных параметров единичного взаимодействия.

Эффективную скорость соударения шара с поверхностью детали можно определить по зависимости:

$$V_{эф} = k_{эф} \cdot A \cdot \omega,$$

где  $A$  – амплитуда колебаний рабочей камеры;  $\omega$  – частота колебаний рабочей камеры;  $k_{эф}$  – коэффициент, учитывающий влияние соседних шариков при ВиОУО.

Максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали определяется следующим образом

$$h_{\max} = 2 \cdot k_{\text{эф}} \cdot A \cdot \omega \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}},$$

где  $R$  - радиус шарика,  $\rho_{ш}$  - плотность материала шарика;  $\sigma_T$  - предел текучести материала детали,  $c$  - коэффициент несущей способности контактной поверхности,  $k_s$  - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

Проекция пятна контакта шарика с поверхностью детали на плоскость представляет собой эллипс с большой и малой полуосями  $a$  и  $b$  соответственно, величины которых можно определить по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) \cdot h_{\max} + b,$$

где  $f$  - коэффициент трения скольжения шарика по материалу обрабатываемой детали.

При ВиОУО изменение шероховатости происходит от исходной до некоторой характерной для данного метода при конкретных технологических режимах обработки. Такую шероховатость называют установившейся. Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости при ВиОУО определим по зависимости:

$$Ra = 0.002 \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot l_{\text{ед}} \cdot a \cdot b}{R^2}},$$

где  $l_{\text{ед}}$  - единичная длина, введенная для сохранения размерности.

Определение рационального времени обработки деталей при ВиОУО играет важную роль в процессе формирования качества их поверхностного слоя. Необходимо избегать такого явления как перенаклёп, который приводит к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нем. Образование перенаклёпа обработанной поверхности способно негативно влиять на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Перенаклёп является необратимым явлением, при котором невозможно восстановление качества поверхностного слоя металла, даже при использовании термообработки. Для наиболее точного прогнозирования и планирования технологического процесса необходимо знать и уметь определять расчетное время обработки до появления перенаклёпа. На основании проведенных исследований получена зависимость для определения времени достижения заданной шероховатости поверхности при ВиОУО:

$$t_F = \frac{4 \cdot h_{\max} \cdot F \cdot R^2}{V_S \cdot f_{\epsilon}}$$

где  $F$  – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности,  $V_S$  – объём деформируемого металла при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью,  $f_{\epsilon}$  – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали

При решении технологических задач ВиОУО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочнения  $h_n$  и степени деформации  $\mathcal{E}$ . От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например, усталостная прочность и долговечность. Если при внедрении индентора в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток), то вокруг нее всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину  $h_n$ . Величина  $h_n$  определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки. Параметр контакта  $h_n$  имеет существенное практическое значение, поскольку прямо или косвенно характеризует механическое состояние (упрочнение, запас пластичности, остаточную напряженность) локальной пластической области при единичном контакте или поверхностного слоя детали, подвергнутой упрочнению.

Такой параметр упрочнения как степень пластической деформации  $\mathcal{E}$  также оказывает влияние на механическое состояние поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Известные технологические зависимости получены с учетом многочисленных допущений и с использованием таких величин, определение которых вызывает сложности. В связи с этим при выведении зависимостей для определения  $h_n$  и  $\mathcal{E}$  ставилась задача использовать параметры, которые легко вычислить при проведении аналитических или определить при экспериментальных исследованиях. Также был учтен тот факт, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т.е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего динамическая твердость  $HD_d$  оказывается больше статической  $HD$ . Количественной мерой возрастания твердости, которая обусловлена динамичностью нагрузки, служит динамический коэффициент твердости  $\eta$  [5], представляющий собой следующее отношение:

$$\eta = \frac{HD_d}{HD}.$$

С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали, как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольной формы и кривизны, получена в работе Сидякина Ю. И. [5]:

$$\eta = 0.5 \left( 1 - \frac{137V_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250 \cdot V_0}{HD}} \right)$$

где  $HD$  - статическая твёрдость,  $V_0$  - начальная скорость удара.

Это выражение позволяет вычислять динамическую твёрдость сталей по их статической твёрдости и начальной скорости удара.

На практике довольно часто прибегают к перерасчету одних чисел твердости в другие. Данные перерасчеты производятся исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не полностью описывают внутренние связи между различными числами твердости. В работе [5], автор предлагает использовать одну из наиболее часто используемых зависимостей для перевода твердости по Бринеллю в динамическую твердость:

$$HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}$$

С учётом вышеприведенной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [5] при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка) получены следующие формулы для расчёта глубины упрочнения:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}},$$

и степени деформации:

$$\varepsilon = 0,025 \cdot \sqrt{k_{эф} \cdot A \cdot \omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{ш}}{\eta \cdot HB^{1,12}}}.$$

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО проведены комплексные экспериментальные исследования.

Исследовано влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности. На рисунках 1-4 приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Сплошной линией на графиках показаны теоретические зависимости, а точками – значения параметров, полученные при экспериментальных исследованиях.

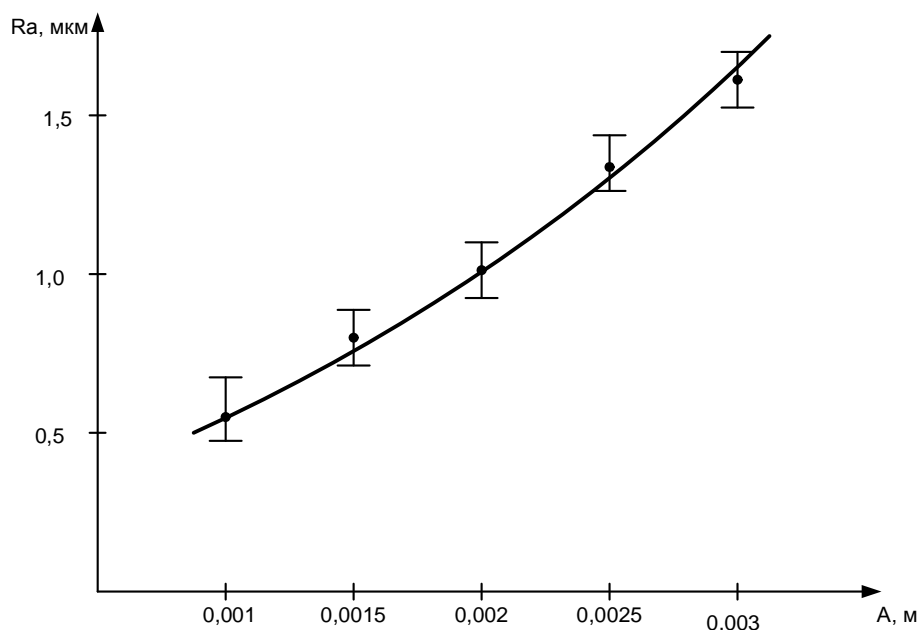


Рисунок 1. Зависимость шероховатости поверхности от амплитуды рабочей камеры:  $\omega=26,7$  Гц,  $R=5$  мм, HB=200.

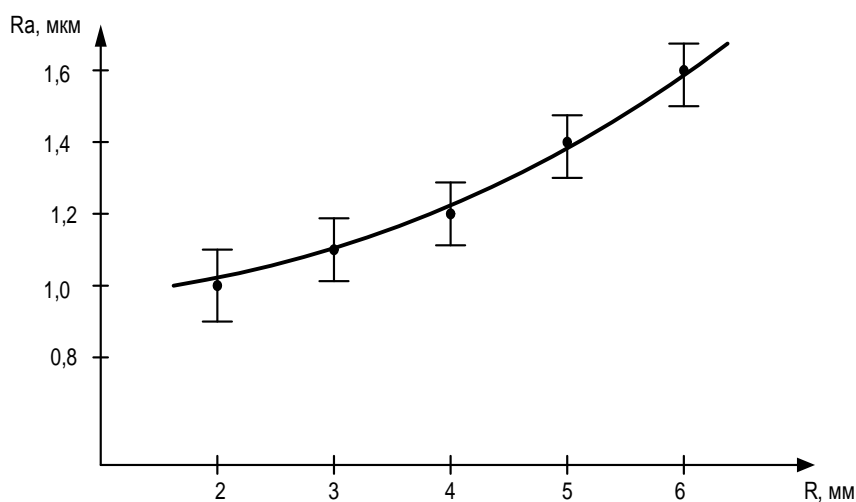


Рисунок 2. Зависимость шероховатости поверхности от радиуса шарика:  $\omega=26,7$  Гц,  $A=0,002$  м, HB=200.

Исследовано также влияние амплитуды рабочей камеры, размера среды и твердости по Бринеллю на формирование глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО. Некоторые результаты представлены на рис. 3 и 4.

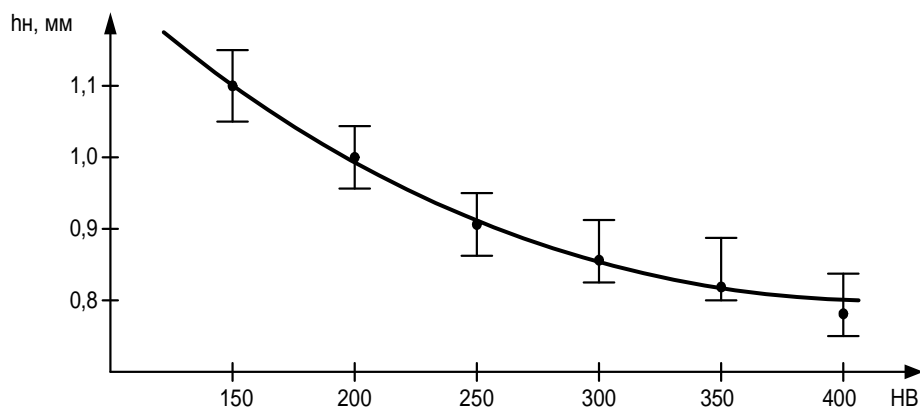


Рисунок 3. Зависимость глубины упрочнения от твердости по Бринеллю:  
 $\omega=26,7$  Гц,  $A=0,002$  м,  $R=5$  мм

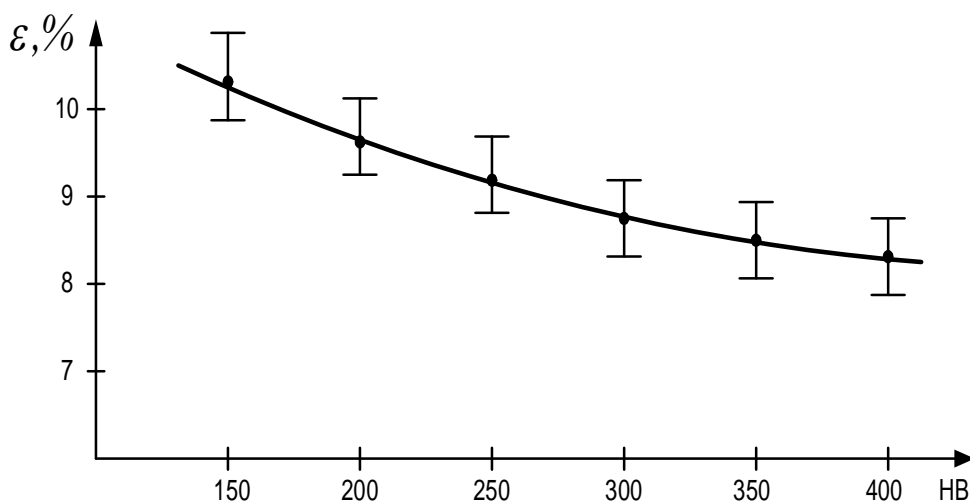


Рисунок 4. Зависимость степени деформации от твердости по Бринеллю:  
 $\omega=26,7$  Гц,  $R=5$  мм,  $A=0,002$  м

Полученный комплекс теоретических моделей процесса ВиОУО, прошедший экспериментальную проверку, может быть использован для аналитического прогнозирования обеспечения надежности технологических процессов. Были произведены расчеты параметров надежности ТП по вышеприведенным зависимостям при возможном разбросе частоты и амплитуды колебаний в пределах 5-10-15 процентов и возможном разбросе диаметров стальных шаров в пределах 5-10-15 процентов при обработке деталей из различных материалов. Некоторые результаты представлены на рисунке 5.

Разработана методика проектирования технологических процессов ВиОУО с учетом обеспечения их надежности и элементы САПР в виде программного модуля. Рассчитываются показатели точности процесса по формулам, полученным выше. Далее пользователем вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого па-



раметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности по зависимости, представленной выше. В случае выполнения условия  $K_3 > 0$ , рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетаний технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

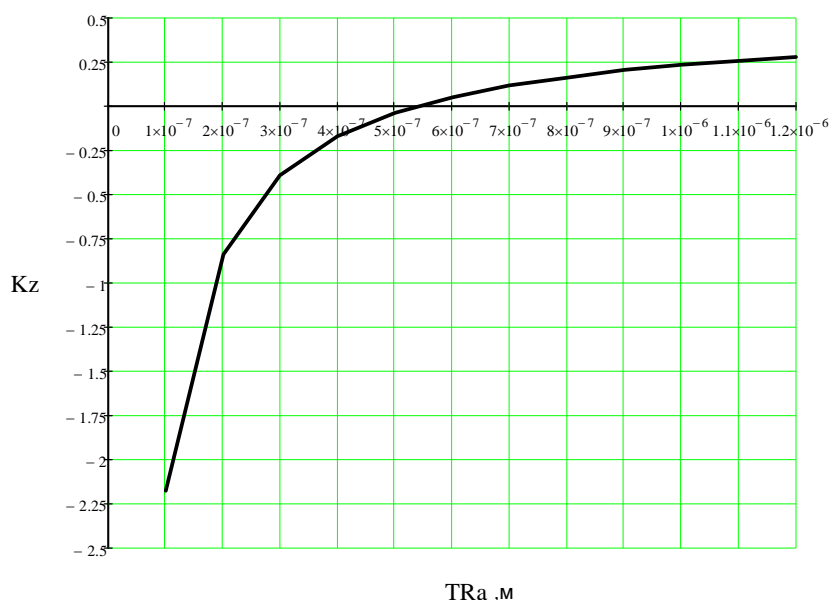


Рисунок 5. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр – шероховатость поверхности Ra. Диапазон изменения допуска 0,1 – 1,2 мкм с шагом 0,1 мкм, диаметр шарика - 10 мм, амплитуда 2,5 мм, частота 26,7 Гц. Материал НВ=200. Разброс – 5%.

Результаты проведенных исследований и методика проектирования ТП позволят обеспечить надежность процесса ВиОУО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корольков, Ю. В. Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива: дис...канд. техн. наук / Ю. В. Корольков. – Ростов на Дону, 2011. – 167 с.
2. ГОСТ 27.202-83 Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. – 28 с.
3. Дубровский, П. В. Обеспечение надежности технологических процессов: Учебное пособие / П. В. Дубровский – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 124 с.
4. Дрозд, М. С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. Сидякин, Ю. И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дисс. докт. техн. наук: 01.02.06 / Ю. И. Сидякин. – М., 2002. – 34 с.

Поступила в редколлегию 21.05.2017 г.