

УДК 621.9.015:658.52.011

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, проф.
Донской государственный технический университет
E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Рассмотрена эффективность процессов шлифования и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин. Установлена функциональная связь между параметрами шероховатости обработанных поверхностей деталей и вероятностью достижения их при заданном значении относительного отклонения допусков на заданные параметры поверхностного слоя. Представлена блок-схема назначения рациональных режимов обработки плоских поверхностей деталей с обеспечением её требуемой безотказной работы.

Ключевые слова: деталь, финишная обработка, параметры качества, эффективность, критерий, относительное отклонение допуска, вероятность обеспечения параметра.

V. I. Butenko

PARTS EFFICIENCY FINISHING OPERATIONS AND THEIR TECHNOLOGICAL RELIABILITY

The grinding processes efficiency and surfaces finishing-strengthening treatment is considered. A functional relationship between the treated surfaces roughness parameters and the probability of achieving them at a given tolerances for the specified surface layer parameters is established. Flat surface finishing block diagram with ensuring its required trouble-free operation is presented.

Keywords: part, finishing, quality parameters, efficiency, criterion, relative deviation of tolerance, probability of providing the parameter.

1. Введение

Технологический процесс механической обработки большинства деталей машин включает финишные операции, основными из которых являются шлифование, отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием, тонкое точение, хонингование, суперфиниширование и другие. Эффективность операций финишной обработки поверхностей деталей машин обычно оценивается достигаемыми показателями качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости и состоянию материала, производительностью обработки и стойкостью используемого инструмента. В настоящее время разработаны различные пути устойчивого обеспечения требуемых показателей качества поверхностного слоя деталей при одновременном повышении производительности обработки и стойкости инструмента [1]. Среди них одно из ведущее мест занимают направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин, включая совершенствование конструкции абразивного инструмента; разработка и исследование новых абразивных материалов, обладающих высокой работоспособностью и прочностью; оптимизация состава абразивной массы для изготовления абразивного инструмента и введение в него компонентов, повышающих эффективность обработки; разработка и использование способов активации подаваемой в зону обработки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и другие [2]. В связи с этим у технологов машиностроительных предприятий возникает проблема выбора эффективной финишной операции обработки конкретной детали с учётом производственных условий предприятия и обеспечения технологической надёжности операции.

2. Основное содержание и результаты работы

По результатам выполненных экспериментальных исследований [1 – 3] было установлено, что критерием для выбора наиболее эффективного состава шлифовального круга и режимов обработки с учётом ограничений, обусловленных точностью изготовления детали, требованиями качества поверхностного слоя (допустимой высотой шероховатости, минимизацией прижогов, величиной технологических остаточных напряжений и т.д.) и надёжностью технологической операции может быть коэффициент шлифовального круга $K_{шк}$, определяемый по формуле

$$K_{шк} = \frac{\sigma_m \cdot J_m}{N}, \quad (1)$$

где σ_m – предел текучести обрабатываемого материала, Па; J_m – интенсивность съёма металла, м³/с; N – мощность, затрачиваемая на процесс шлифования, Вт.

Как показали исследования, коэффициент $K_{шк}$ является индивидуальным для каждого конкретного шлифовального круга, определяется его составом и состоянием и не зависит от режимов обработки детали, т.к. с их изменением изменяется и мощность N . С увеличением коэффициента $K_{шк}$ производительность обработки увеличивается, а мощность N , затраченная на процесс шлифования, уменьшается, что обеспечивает снижение себестоимости обработки. При шлифовании поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов величина коэффициента $K_{шк}$ изменяется в диапазоне $(0,95 - 2,53) \times 10^{-4}$ в зависимости от вида используемого абразивного материала, его зернистости, состава абразивной массы, вида и твёрдости связки, пористости и других факторов, характеризующих шлифовальный круг.

Однако использование в практике металлообработки формулы (1) не позволяет разработчикам технологических процессов механической обработки деталей гарантировать заданное эксплуатационными условиями качество получаемого поверхностного слоя с требуемой надёжностью. При этом у разработчиков технологических процессов возникает необходимость учёта технологической наследственности при формировании показателей качества поверхностного слоя детали, что предопределяет их предварительную вероятностную оценку для конкретного технологического процесса [3]. В связи с этим задача совместного решения вопросов повышения эффективности финишных операций механической обработки деталей и обеспечения параметрической надёжности получаемых показателей качества поверхностного слоя имеет большую практическую значимость.

Были проведены экспериментальные исследования параметрической надёжности технологических операций обработки цилиндрических поверхностей деталей, подвергаемых предварительному чистовому точению и последующему шлифованию. Исследования проводились на образцах из стали 12Х2Н4А диаметром 32 мм и длиной 280 мм. Предварительное чистовое точение осуществлялось на токарно-винторезном станке мод. 16К20 резцами с пластинками твёрдого сплава Т15К6 со скоростью резания 0,67 м/с, подачей 0,1 мм/об и глубиной резания 0,3 мм. Последующее шлифование деталей осуществлялось на круглошлифовальном станке мод. 3М151 кругами ПП 400×127×60 14АФ60К7V ГОСТ Р 52587-2006 при скорости резания $V_{кр} = 34,8$ м/с, скорости вращения образцов $V_d = 0,314$ м/с, продольной подаче $S_{пр} = 0,02$ м/с, подаче врезания (глубине резания) $S_{вр} = 0,01$ мм/дв.ход. В качестве СОЖ использовался 5-процентный водный раствор эмульсола Укринол-1. Обработка поверхностей деталей велась как стандартными шлифовальными кругами, так и кругами, подвергнутыми импрегнированию в водном растворе диодидом хрома по технологии, описанной в работе [4].

Используя методику исследования закономерностей изменения параметров качества поверхности детали, в процессе обработки, изложенную в работах [5 – 7], для выявления наиболее значимых параметров шероховатости поверхностного слоя детали на её эксплуатационные показатели (износостойкость и коррозионно-усталостную прочность) были построены диаграммы Парето, позволившие установить следующие наиболее значимые параметры шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73:

- среднее арифметическое отклонение профиля неровностей Ra ;
- наибольшая высота неровностей профиля R_{max} ;
- средний шаг неровностей профиля S_m .

В исследованиях определялась функциональная связь между параметром надёжности обеспечения требуемых значений Ra , R_{max} , S_m в процессе обработки детали $p(t)$ и относительными отклонениями допусков на них δ_1 , δ_2 , δ_3 , установленных конструкторами и вычисляемых по формулам:

$$\delta_1 = 2 \frac{(Ra)_{max} - (Ra)_{min}}{(Ra)_{max} + (Ra)_{min}}; \quad \delta_2 = 2 \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}}; \quad \delta_3 = 2 \frac{(S_m)_{max} - (S_m)_{min}}{(S_m)_{max} + (S_m)_{min}}, \quad (2)$$

где $(Ra)_{max}$, $(Ra)_{min}$, R_{max} , R_{min} , $(S_m)_{max}$, $(S_m)_{min}$ – максимальные и минимальные значения исследуемых параметров шероховатости поверхности детали, определяющие их допуск.



Рисунок 1. Зависимости вероятности технологического обеспечения надёжности $p(t)$ параметров шероховатости Ra (кривые 1, 4, 7), R_{max} (кривые 2, 5, 8) и S_m (кривые 3, 6, 9) от величины относительного отклонения допусков на них δ при чистовом точении и последующем шлифовании стандартным и импрегнированным кругом деталей из стали 12Х2Н4А

В исследованиях область факторного пространства определялась допустимыми диапазонами изменения параметров шероховатости поверхности детали Ra , R_{max} , S_m , определяющих значения относительных отклонений допуска δ_1 , δ_2 , δ_3 при обязательном обеспечении заданной точности диаметра обработанной детали 30h7 (-0,021) мм. По

результатам выполненных экспериментальных исследований были построены графики зависимостей $p(t) = f(\delta)$ по каждому значимому параметру шероховатости (рис. 1).

Анализ полученных графиков свидетельствует о том, что вероятность формирования параметров шероховатости Ra , R_{max} , S_m при заданных значениях относительных отклонений допуска δ_1 , δ_2 , δ_3 зависит не только от способа финишной обработки поверхности детали, но и от состояния используемого инструмента. Так, при значении $\delta_1 = 0,3$ вероятность формирования параметра шероховатости Ra составляет $p(t) = 0,5$ при чистовом точении, $p(t) = 0,80$ при шлифовании стандартным кругом и $p(t) = 0,94$ при шлифовании кругом, импрегнированным диоксидом хрома. Для параметра шероховатости поверхности R_{max} вероятность обеспечения $\delta_2 = 0,3$ составляет соответственно 0,47 при чистовом точении, 0,76 при шлифовании стандартным кругом и 0,90 при шлифовании импрегнированным кругом. При $\delta_3 = 0,3$ с вероятностью $p(t) = 0,57$ обеспечивается параметр S_m при чистовом точении, $p(t) = 0,84$ при шлифовании стандартным кругом и $p(t) = 0,89$ при шлифовании импрегнированным кругом.

Из представленных на рис. 1 графиков следует, что при часто задаваемой вероятности обеспечения параметров шероховатости обработанной поверхности детали $p(t) = 0,9$ необходимо задать значение относительного отклонения допуска δ_1 на параметр Ra не менее 0,62 при чистовом точении, 0,38 при шлифовании стандартным кругом и 0,26 при шлифовании импрегнированным кругом; на параметр R_{max} необходимо задать значение относительного отклонения допуска δ_2 не менее 0,62 при чистовом точении, 0,40 при шлифовании стандартным кругом и 0,30 при шлифовании импрегнированным кругом; на параметр S_m , соответственно, $\delta_3 = 0,55$ при чистовом точении, $\delta_3 = 0,38$ при шлифовании стандартным кругом и $\delta_3 = 0,32$ при шлифовании импрегнированным кругом. Согласно исследованиям, выполненным в работах [5 – 7], такое различие в назначении величин относительного отклонения допуска δ по параметрам шероховатости обработанной поверхности детали Ra , R_{max} , S_m обусловлено сложной зависимостью надёжности $p(t)$ от величины δ , которая может быть оценена показателем информационной энтропии, учитывающим не только способ финишной обработки поверхности детали, но и состояние инструмента, условия и режимы обработки, технологическую наследственность, жёсткость используемой технологической системы и другие факторы [8].

В практике машиностроительного производства в качестве финишных операций обработки поверхностей деталей широко применяются различные способы отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), например, упрочняющая обкатка плоских поверхностей деталей роликом [1]. С помощью диаграммы Парето было установлено, что при чистовом фрезеровании поверхности детали значимыми параметрами качества поверхностного слоя являются Ra , R_{max} , S_m , а при обкатке плоской поверхности упрочняющим роликом значимыми параметрами качества поверхностного слоя, влияющие на его эксплуатационные показатели, являются среднее арифметическое отклонение профиля неровностей Ra и наибольшая высота неровностей профиля R_{max} . По-видимому, это обусловлено тем, что при обкатке плоской поверхности детали упрочняющим роликом шаг неровностей вдоль продольной подачи формируется исключительно шероховатостью рабочей поверхности упрочняющего ролика и точностью его изготовления, а в поперечном направлении неровности практически не образуются вследствие перекрытия фаской рабочего профиля ролика поперечной подачи.

Для установления функциональной связи между относительными допусками на параметры Ra , R_{max} , S_m и вероятностью их технологического обеспечения $p(t)$ с учётом

технологической наследственности проведены исследования процесса формирования параметров шероховатости на 64 образцах из стали 12Х2Н4А с размерами $B \times H \times L = 50 \times 30 \times 150$ мм, подвергаемых обработке по маршруту: чистовое фрезерование – обкатка упрочняющим роликом. Предварительное чистовое фрезерование исследуемых поверхностей образцов осуществлялось на вертикально-фрезерном станке мод. 6П13 торцовыми фрезами диаметром 125 мм с механическим креплением сменных многогранных пластин 86410 вк8 ($16 \times 6 \times 3 \times 18$) по ГОСТ 26595-2014 (ISO 6462:2011). Были приняты следующие режимы фрезерования: скорость резания $V_{фр} = 1,63$ м/с, минутная подача $S_{мин} = 40$ мм/мин (подача на зуб фрезы $S_z = 0,01$ мм/зуб, число зубьев фрезы $Z_f = 16$), глубина резания $t = 0,5$ мм. Обкатка поверхностей образцов осуществлялась при помощи устройства для упрочняющей обработки плоских поверхностей [2], которое устанавливалось в шпинделе вертикально-фрезерного станка мод. 6П13. Радиус упрочняющего ролика из закалённой быстрорежущей стали Р6М5 составлял 42 мм и имел рабочий профиль радиусом $R = 16$ мм. Обкатка производилась на следующих режимах: усилие обкатки $P = 800$ Н, продольная подача $S_{пр} = 0,02$ м/с, число проходов $m = 1$.

Результаты исследования функциональной зависимости между относительными допусками на параметры Ra , R_{max} , S_m и вероятностью их технологического обеспечения $p(t)$ в виде графиков приведены на рис. 2, из анализа которого следует, что применение в качестве финишной обработки поверхностного слоя детали обкатки упрочняющим роликом позволяет существенно уменьшить величину относительного отклонения допуска δ по параметрам

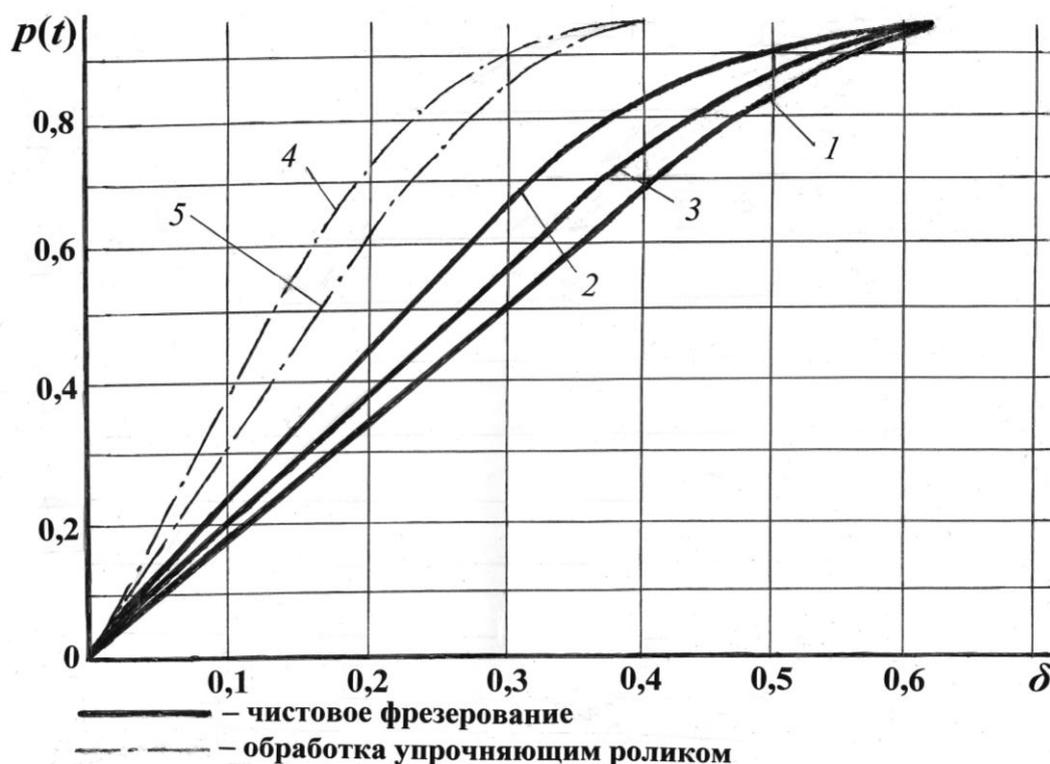


Рисунок 2. Зависимости вероятности технологического обеспечения параметров шероховатости Ra (кривые 1, 3) и S_m (кривые 2, 4) от величины относительного отклонения допусков на них δ при чистовом фрезеровании и последующей обкатке упрочняющим роликом плоских поверхностей деталей из стали 12Х2Н4А

шероховатости обработанной поверхности детали при обеспечении заданной вероятности достижения параметров Ra и R_{max} . Так, с вероятностью $p(t) = 0,6$ величина относительного отклонения допуска δ_1 , устанавливаемого на параметр Ra , составит 0,35 при чистовом фрезеровании и 0,19 при обкатке поверхности упрочняющим роликом. Соответственно, при $p(t) = 0,6$ для параметра шероховатости R_{max} величина относительного отклонения допуска δ_2 составит 0,27 при чистовом фрезеровании и 0,16 при обкатке упрочняющим роликом. При этом величина относительного отклонения допуска δ_3 при чистовом фрезеровании поверхности детали составит 0,33.

Если задать вероятность обеспечения параметров шероховатости обработанной поверхности детали $p(t) = 0,9$, то необходимо установить на значения величин относительного отклонения допусков при чистовом фрезеровании $\delta_1 = 0,56$, $\delta_2 = 0,50$, $\delta_3 = 0,54$; при обкатке поверхности упрочняющим роликом значения величин относительного отклонения допусков составят: $\delta_1 = 0,30$, $\delta_2 = 0,34$. По заданным значениям δ_1 , δ_2 , δ_3 могут быть назначены режимы обработки детали, используя, например, блок схему назначения режимов обработки плоских поверхностей деталей с обеспечением вероятности безотказной работы детали (рис. 3).

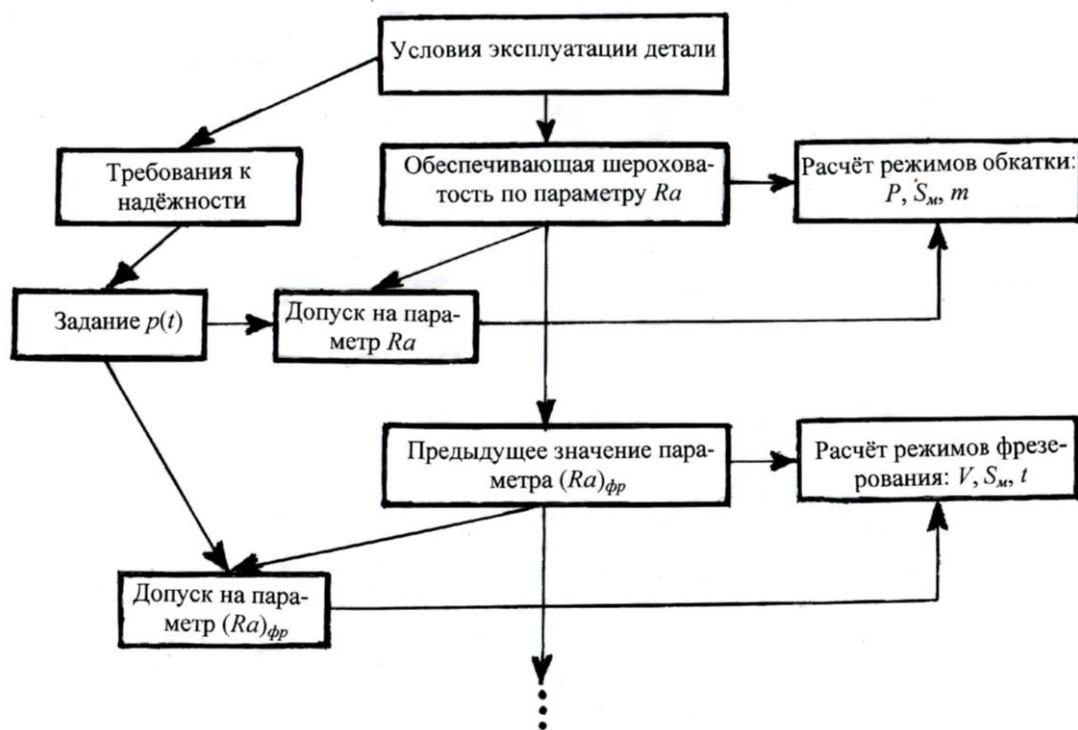


Рисунок 3. Блок-схема назначения режимов обработки поверхностей с обеспечением вероятности безотказной работы деталей $p(t)$

3. Заключение

Таким образом, по результатам выполненных исследований можно сформулировать две технологические задачи, от решения которых зависит эффективность финишной обработки детали:

1 – задавая величины относительного отклонения допусков δ на параметры шероховатости поверхности детали, можно определить вероятность их обеспечения;

2 – зная требуемую по условиям эксплуатации вероятность обеспечения параметров шероховатости поверхности детали, можно установить значения величин относительного отклонения их допусков δ .

Успешное решение этих задач в машиностроительном производстве возможно при тесном контакте технологов с конструкторскими и эксплуатационными службами предприятия.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат центр ДГТУ, 2017. – 481 с.
2. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
3. Бутенко, В.И. Оценка параметрической надёжности технологических систем и операций по параметрам качества поверхностного слоя обрабатываемой детали / В. И. Бутенко, А. В. Тарасов, Л. В. Гусакова // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2020. – С. 633 – 637.
4. Пат. 2703063 Российской Федерации МПК В24Д 3/34. Способ импрегнирования абразивных инструментов / В. И. Бутенко, К.В. Давиденко. – 2019. – Бюл. №29.
5. Нагоркин, М.Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М.Н. Нагоркин // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2019. – №5. – С. 125-130.
6. Фёдоров, В. П. Надёжность и диагностика технологических систем механообработки; учеб. пособие / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин. – Брянск: Изд.-во БГТУ, 2013. – 116 с.
7. Фёдоров, В. П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва. – Брянск: Изд.-во БГТУ, 2012. – 192 с.
8. Гоголев, А. Я. Надёжность оборудования ГПС и качество обработки / А. Я. Гоголев, В. И. Бутенко, А. В. Чистяков. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1992. – 184 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2021 г.