



Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 2

© Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработка алгоритма реализации системы управления качеством кромки при финишной обработке деталей полимерно-абразивными щетками, рассмотренной в части 1. Использован принцип системного подхода для формализованного описания системы с наличием взаимосвязей между образующими ее подсистемами. В статье рассмотрен алгоритм проектирования технологической операции обработки кромок в соответствии с системой оптимального управления, описанной в части 1. Исходными данными явились: параметры заготовки, требования по шероховатости и параметрам кромки, характеристики инструмента и оборудования. На основе проведенного анализа функциональных возможностей операции получен алгоритм выбора оптимального инструмента среди конкурирующих, с учетом технологических возможностей операции. На базе разработанных математических моделей (формирование скругленной кромки по размеру, форма и шероховатость, сила резания, температура в зоне обработки, износ инструмента) проведена оптимизация технологических параметров операции. Разработанный алгоритм проектирования технологической операции предусматривает проведение пробной операции (установка и крепление заготовки на оборудовании, ее обработка на оптимальных режимах) и контроль соответствия результатов обработки требованиям нормативно-технических документов, анализ дефектов и причин их возникновения, а также формирование управляющего воздействия. Рассмотрена управляющая подсистема «Оптимизация процесса скругления кромок». Разработанная система проектирования технологической операции обработки кромки эластичными полимерно-абразивными щетками позволяет назначать наиболее эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки с обеспечением всех требований нормативно-технических документов по качеству обработки при наибольшей производительности процесса и наименьшей себестоимости выполнения операции.

Ключевые слова: финишная обработка, система оптимального управления, эластичный инструмент, требуемое качество, оптимальная производительность

Для цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 2. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1178–1189. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1178-1189>

Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 2

Yury V. Dimov, Dmitry B. Podashev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The goal is to develop an algorithm for implementing the edge quality management system for finishing parts with polymer-abrasive brushes, discussed in part 1. The principle of the system approach is used for a formalized description of the system with the presence of relationships between its constituent subsystems. The article considers the algorithm for designing the technological operation of edge processing in accordance with the optimal control system described in part 1. The initial data were: parameters of the workpiece, requirements for roughness and edge parameters, characteristics of tools and equipment. Based on the analysis of the functional capabilities of the operation, an algorithm for selecting the optimal tool among competing ones is obtained, taking into account the technological capabilities of the operation. Based on the developed mathematical models (formation of a rounded edge in size, shape and roughness, cutting force, temperature in the processing zone, tool wear), the optimization of technological parameters of the operation was carried out. The developed algorithm for designing a technological operation provides for conducting a test operation (installing and attaching the workpiece to the equipment, processing it at optimal modes) and monitoring the

compliance of processing results with the requirements of regulatory and technical documents, analyzing defects and their causes, as well as forming a control effect. The control subsystem "Optimization of the process of rounding edges" is considered. Developed system for design of technological operations of processing of the edge elastic polymer-abrasive brushes allows you to assign the most effective tools and rational regime treatment parameters ensuring all requirements of normative-technical documents on the quality of processing at the highest productivity and lowest cost of operation.

Keywords: finishing, optimal control system, flexible tool, required quality, optimal performance

For citation: Dimov YuV, Podashev DB. Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1178–1189. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1178-1189>

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ КРОМОК

Алгоритм проектирования операции скругления кромки эластичными полимерно-абразивными инструментами, разработанный в соответствии с принципами, изложенными в части I, представлен на рис. 1.

Исходными данными для проектирования технологической операции служат:

1) параметры заготовки (блок 1) – конструктивные, размерные, физико-механические свойства, исходная шероховатость, наличие заусенцев и труднодоступных участков;

2) технические требования на обработанную деталь (блок 2) – требуемая шероховатость, требуемый размер кромки, отклонение месторасположения кромки;

3) имеющийся в наличии эластичный инструмент и его свойства (блок 3) – конструкция, размеры, материал зерна, температура плавления связки, зернистость, модуль упругости, жесткость, износостойкость;

4) имеющееся в наличии оборудование (блок 4) – станок с ЧПУ, промышленный робот, специальный станок, универсальный станок.

Целями обработки являются: скругление острых кромок (блок 5) с требуемыми размерами и геометрическими параметрами.

Финишная обработка эластичными полимерно-абразивными инструментами, как и любой другой вид обработки, обладает определенными ограничениями в функциональных возможностях операций. Блок 6 предусмотрен для проведения анализа функциональных возможностей операций. Если реализация невозможна, информация передается на блок 8, где решается вопрос о передаче информации на блок 10 для формирования управ-

ляющего воздействия (выбор другого инструмента из имеющихся в наличии, свойства которого позволяют выполнить реализацию данной операции, возможно приобретение нового инструмента с необходимыми свойствами, выбор другого оборудования) или об отказе от дальнейшего проектирования операции (полное несоответствие параметров заготовки функциональным возможностям операции, полное отсутствие на предприятии необходимого инструмента и оборудования).

Если функциональные возможности не препятствуют реализации данной операции (блок 7), то информация передается в блок 9 для дальнейшего проектирования операции. При этом следует отметить, что в наличии на предприятии может оказаться сразу несколько инструментов, которыми можно выполнить рассматриваемую операцию (конкурирующие инструменты). Таким образом, дальнейшее проектирование операции сводится к выбору инструмента и режимных параметров обработки, при которых достигается требуемое качество обработки при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции. В блоке 9 осуществляется выбор любого инструмента среди конкурирующих с учетом технологических рекомендаций, в том числе приведенных по результатам исследований, описанных в работах [1–23]. Так, например, для скругления легкодоступных кромок, в том числе на длиннономерных деталях, рекомендовано использование эластичных полимерно-абразивных радиальных щеток. Для обработки зон ограниченного доступа, сочетаний различных поверхностей и т.д. целесообразно использование торцевых щеток или радиальных щеток малого диаметра.



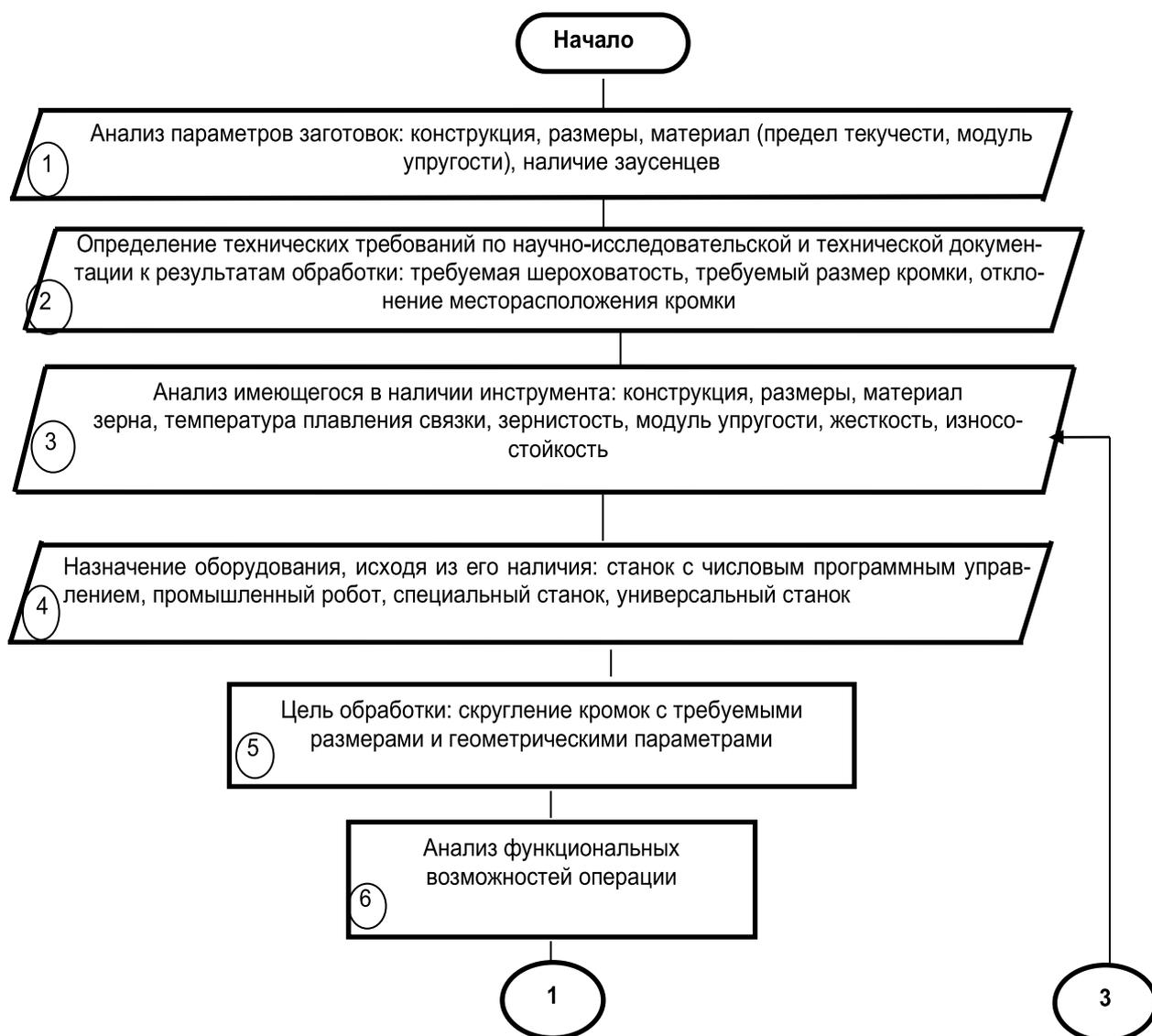
Для выбора инструмента, который способен обеспечить оптимальные режимные параметры обработки, необходимо использовать разработанные математические модели для операции скругления кромок, рассмотренные в части 1.

Для того чтобы воспользоваться предложенными математическими моделями, необходимо иметь следующие исходные данные:

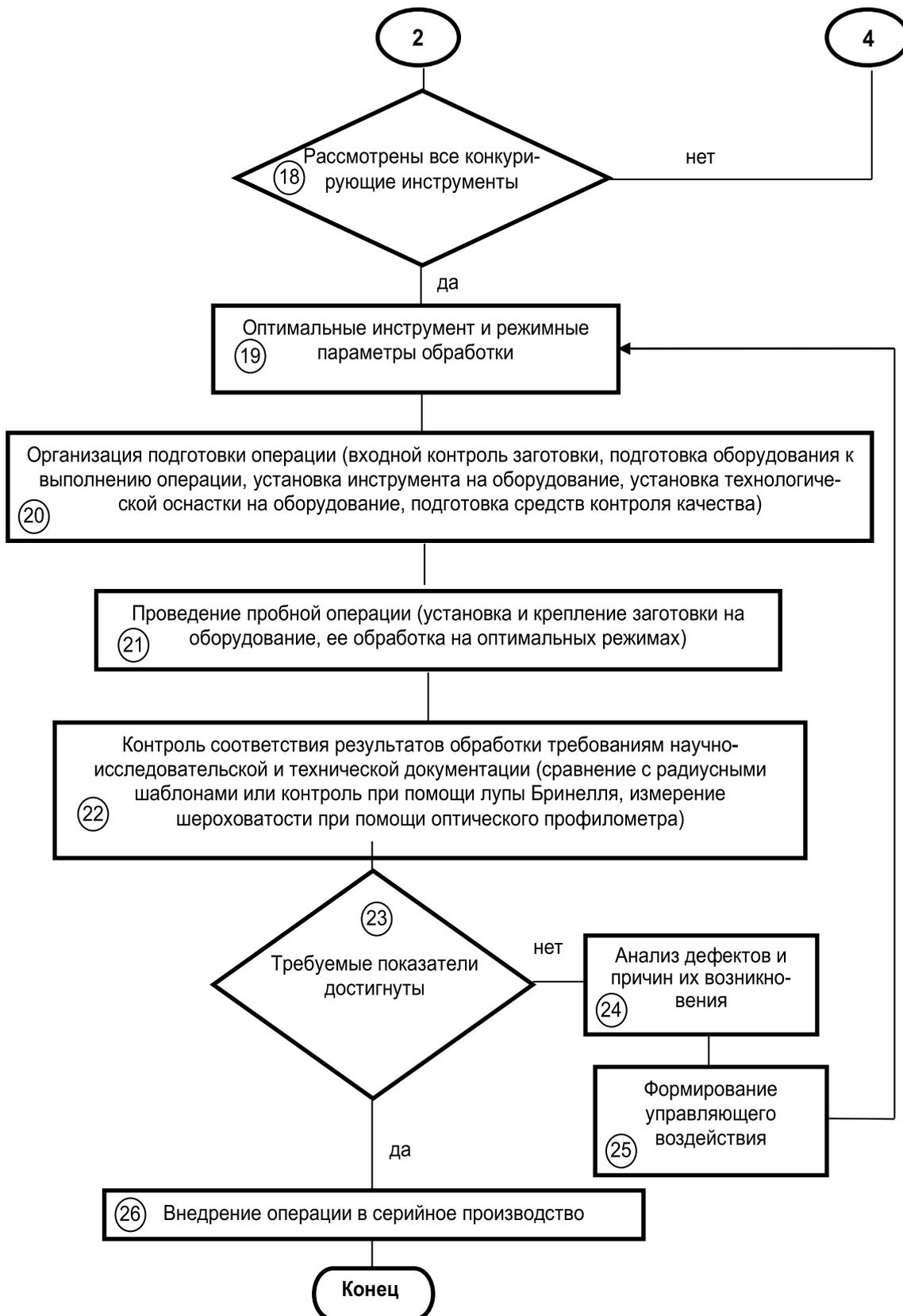
- характеристики оборудования (обеспечиваемые режимы обработки);
- характеристики заготовки: размеры обработки, наличие заусенцев и зон ограниченного доступа);
- характеристики инструмента (жесткость, модуль упругости, температура плавления

связки, пределы варьирования режимных параметров обработки).

Если все вышеперечисленные исходные данные имеются (блок 11), то осуществляется введение этих данных в разработанные математические модели (блоки 13 и 14) и переход к блоку 15. Следует отметить, что, как правило, для получения требуемых исходных данных необходимо статистически оценивать как средние, так и предельные величины указанных параметров. Пределы варьирования режимных параметров обработки определяются из условий стойкости инструмента и достаточности для решения рассматриваемой технологической задачи.



a



с

Рис. 1. Схема алгоритма проектирования операций скругления кромки (а–с)
Fig. 1. Diagram of the algorithm for designing rounding operations (a–c)

Если для выбранного инструмента и материала заготовки проведены соответствующие исследования (блок 15), то осуществляется расчет вышеописанных показателей по имеющимся эмпирическим моделям и переход к блоку 17. Если таких исследований нет, то необходимо проведение соответствующих исследований (блок 16) и построение эмпирических моделей в соответствии с методиками, изложенными в соответствующих разделах работы.

Таким образом, на основе разработанных теоретических и эмпирических моделей проводится оптимизация технологических параметров для выбранного инструмента (блок 17).

Для оптимизации рассматриваемых технологических операций назначаются технологические ограничения: достижимая шероховатость R_a поверхности детали, обеспечиваемая данным инструментом, размер кромки. После перебора всех сочетаний варьируемых режимных параметров, определяется сочетание режимов (скорость резания V (частота вращения n для торцевых инструментов), деформация инструмента (ΔY), подача S , углы положения инструмента относительно обрабатываемой кромки (α , β), смещение A относительно обрабатываемой кромки для торцевых инструментов), обеспечивающее выполнение рассматриваемых технологических операций с наибольшей производительностью и наименьшей себестоимостью при соблюдении всех необходимых ограничений.

Если рассмотрены не все конкурирующие инструменты, которые можно применить для выполнения исследуемой операции, то необходимо осуществить выбор следующего инструмента (возврат к блоку 9).

После того, как все конкурирующие инструменты рассмотрены, и оптимизация технологических параметров для них проведена, осуществляется выбор оптимального инструмента среди конкурирующих и определение оптимальных режимов обработки V (или n для торцевых щеток), ΔY , S (блок 19). Основным критерием выбора оптимального инструмента является его наибольшая экономическая эффективность (минимальная себестоимость выполнения операции).

Следует отметить, что для получения стабильного качества обработки и получения достоверных результатов по предложенным теоретическим и эмпирическим математическим моделям при проектировании операции в целом требуется наличие в технологическом процессе ряда организационно-технических мероприятий, а именно:

1. Организация подготовки операции (блок 20), которая включает в себя:

- организацию технологических мероприятий статистического контроля качества заготовок, поступающих на выполнение рассматриваемых в настоящей работе операций, по перечисленным характеристикам (см. блок 1). При оценке состояния обрабатываемой заготовки производится измерение размеров, фиксируются предел прочности, предел текучести, модуль упругости, коэффициент Пуассона. В целях снижения временных и трудовых затрат на проведение данных мероприятий целесообразно организационно обеспечить стабильное соответствие поставляемых заготовок требуемым характеристикам;

- подготовку оборудования к выполнению операции (запуск, анализ 3D-модели детали, разработку управляющих программ и т.д.), установку инструмента и технологической оснастки на оборудование;

- подготовку средств контроля качества обработки.

2. Проведение пробной операции (блок 21), которая подразумевает:

- установку и крепление заготовки на оборудование;

- обработку детали оптимальным инструментом на оптимальных режимах с соблюдением всех технологических рекомендаций. Такими технологическими рекомендациями могут быть: соблюдение рекомендаций по периодическому контролю износа и своевременной замене критически изношенного инструмента. Критический износ устанавливается опытным путем и зависит от вида инструмента и условий производства;

- проведение периодической корректировки натяга (деформации) ΔY в связи с износом инструмента. Параметром, по которому необходимо оценивать состояние изно-



шенности инструмента, является время Тизн, в течение которого натяг ΔY уменьшился на допустимую величину износа Иззн.

3. Организация контроля соответствия результатов обработки эластичным полимерно-абразивным инструментом требованиям научно-исследовательской и технической документации (НТД).

При анализе требований НТД следует обратить внимание на допустимые колебания шероховатости, размеров кромок, точности их формы и месторасположения. Контроль соответствия результатов обработки требованиям НТД может осуществляться при обработке кромок (блок 22): контроль по радиусным шаблонам или контроль при помощи лупы Бринелля, включая контроль стабильности обработки кромок на протяженных и труднодоступных участках, а также измерение шероховатости при помощи эталонов шероховатости и лупы.

Если требуемые НТД показатели качества обработки достигнуты (блок 23), то следует констатировать, что возможно внедрение рассматриваемых операций в серийное производство (блок 26).

Если требуемые НТД показатели качества обработки не достигнуты, то необходимо осуществить анализ дефектов и причин их возникновения (блок 24).

Причины возникновения дефектов могут быть следующими:

– заготовка представлена с исходными показателями по входным параметрам, отличающимися, в связи с их стохастическим характером, от показателей, введенных номинальных (средних) значений в рассматриваемую систему управления;

– взаимное расположение поверхностей в заготовке не позволяет полностью реализовать финишную операцию эластичными полимерно-абразивными инструментами на всех поверхностях, отдельные участки могут быть с отклонениями от требуемых параметров качества;

– инструмент существенно отличается (и не мог быть обнаружен при выполнении контроля по блоку 20) по своим эксплуатационным показателям от исследованного инструмента такой же марки и введенного в систему.

Разработанная в настоящей работе система управления позволяет минимизировать влияние приведенных выше причин путем:

1) проведения дополнительных экспериментальных исследований по фактическим показателям заготовки и имеющегося инструмента;

2) введения дополнительной операции по обработке труднодоступного участка со сменной инструмента, которым такой участок может быть обработан;

3) возвращения к блоку 19 и корректировки полученных режимов обработки V (или n для торцевых щеток), ΔY и S . Корректировка может проводиться за счет любого из этих параметров. Например, если при обработке кромки обнаружен не полностью удаленный заусенец и не достигнуто требуемое значение параметра Q , то корректировку можно осуществить за счет изменения подачи S . Для этого из уравнения [7] количества материала, снятого при скруглении кромки, определяется подача S , при которой будет обеспечен требуемый размер кромки Zk :

$$Q = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}$$

При заданных Q , ΔY , V , подача S определяется по формуле:

$$S = \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4a_3 \cdot f}}{2a_3},$$

где $d = a_6 + a_8 \cdot \Delta Y + a_9 \cdot V + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V$;
 $f = a_1 \cdot (\Delta Y)^2 + a_2 \cdot V^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_{11} - Q$.

Аналогичная корректировка может быть выполнена при обработке кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками.

Для оптимизации режимных параметров при скруглении кромок деталей из материалов, рассмотренных в настоящей работе, исследованными эластичными полимерно-абразивными щетками, разработаны программные модули, алгоритм реализации.

УПРАВЛЯЮЩАЯ ПОДСИСТЕМА «ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СКРУГЛЕНИЯ КРОМОК»

Управляющая подсистема оптимизации процесса скругления кромок деталей эластичными полимерно-абразивными щетками разработана на основе математических моделей:

- производительности процесса обработки (Q);
- точности месторасположения (позиционирование) радиуса – δ ;
- достижимой шероховатости поверхности скругленных кромок;
- износа инструмента;
- температуры в зоне резания;
- силы резания.

Структура подсистемы оптимизации при заданном инструменте представлена на рис. 2. При оптимизации процесса обработки в

качестве критерия оптимизации целесообразно принять целевую экономическую функцию (ЦЭФ), которая рассчитывается по приведенной ниже программе для определенного инструмента. ЦЭФ предназначена для оценки себестоимости всех вариантов процесса и выбора режимов обработки с наименьшим ее значением. Критерием выбора оптимального из рассматриваемых инструментов является минимальное значение ЦЭФ:

$$ЦЭФ = T_{обр} \cdot (C_T + Z_{эл}) + T_B \cdot C_T + C.$$

ЦЭФ включает в себя следующие целевые функции (ЦФ):

- ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$;
- ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы $Z_{эл}$;



Рис. 2. Структура подсистемы оптимизации скругления кромок эластичными полимерно-абразивными щетками
 Fig. 2. The structure of the subsystem for optimizing rounding of edges with elastic polymer abrasive brushes



– ЦФ стоимости эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции С.

Ограничительными функциями (ОФ) для различных инструментов являются уравнения достижимой шероховатости, размера кромки и температуры резания для торцевых щеток.

В состав ЦЭФ входят:

1. Измеряемые и регулируемые в процессе выполнения операции входные переменные. Для ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$ такими переменными являются: скорость резания V (для торцевых щеток – частота вращения n), деформация инструмента ΔY , продольная подача S .

2. Измеряемые и нерегулируемые в процессе выполнения операции входные переменные:

– для ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$ – это длина обрабатываемой кромки; параметры эластичного полимерно-абразивного инструмента (B_k – ширина инструмента, r_k – радиус втулки инструмента, D_k – диаметр инструмента, ρ – плотность материала инструмента);

– для ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы ($Z_{эл}$) – это требуемая мощность привода ($N_{эл}$) и стоимость одного кВт/ч ($C_{эл}$);

– для ЦФ стоимости эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции (С) – это, собственно, стоимость эластичного полимерно-абразивного инструмента ($C_{кр}$);

– для ЦЭФ в целом – это тарифная ставка рабочего (C_T), вспомогательное время операции ($T_{в}$).

3. Выходные параметры. Для ЦЭФ – себестоимость операции обработки кромки эластичным полимерно-абразивным инструментом.

Основное время обработки:

$$T_r = \frac{l_r}{S}, \quad (1)$$

где l_r – длина обрабатываемой кромки, мм;
 S – подача вдоль кромки, мм/мин.

Затраты на электроэнергию. Для выполнения операции зачистки поверхности затраты на расход электроэнергии в единицу времени работы зависят от требуемой мощности на процесс резания и стоимости 1 кВт·ч.

$$Z_{эл} = N_{эл} \cdot C_{эл},$$

где $C_{эл}$ – стоимость одного кВт·ч, руб; $N_{эл}$ – требуемая мощность привода, в кВт:

$$N_{эл} = 60 \cdot P_z \cdot \pi \cdot D_k \cdot n / 10^6.$$

Здесь P_z – тангенциальная сила резания, Н; D_k – диаметр инструмента, мм; n – частота вращения инструмента, мин^{-1} .

Стоимость эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции. В процессе обработки кромки износ инструмента зависит от его интенсивности и продолжительности обработки. Стоимость изношенного инструмента на выполнение операции обработки кромки определяется по формуле:

$$C = \frac{C_{ш} \cdot l_{изн} \cdot T_r}{L_B \cdot K_{изн}},$$

где $C_{ш}$ – стоимость щетки, руб; $K_{изн}$ – коэффициент допустимого износа инструмента (рекомендуется $K_{изн} = 0,5$; $l_{изн}$ – длина изношенной части ворсины, мм; T_r – время обработки кромки по уравнению (1), мин; L_B – длина ворсины, мм.

Таким образом, разработанная система проектирования технологической операции обработки кромки эластичными полимерно-абразивными щетками позволяет назначать наиболее эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки, а, следовательно, обеспечить требования НТД по качеству обработки, стабильность обработки при наибольшей производительности процесса и наименьшей себестоимости выполнения операции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система выдает оптимальные инструмент и режимы обработки в результате выполнения своих функций. При

реализации этой информации, в технологическом процессе изготовления детали, обеспечиваются требуемые показатели качества и оптимальная производительность.

Список литературы

1. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. Вып. 73. С. 59–62.
2. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 9. 2016. С. 23–34.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-23-34>
3. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник машиностроения. № 3. 2017. С. 74–78.
4. D'yakonov A.A., Shipulin L.V. Selecting the cutting conditions for plane grinding by the wheel periphery // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 12. P. 814–816. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14120119>
5. Дядя С.И., Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Черный В.И., Алексеенко О.В. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2010. № 2. С. 145–148.
6. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with con-vex and concave profile tools // Solid State Phenomena. 2018. Vol 284. P. 281–288.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281>
7. Fomin A.A. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cutting control system // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076117>
8. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone GEL/SiC composites for elastic abrasive // Advanced Composites Letters. 2018. Vol. 27. Issue 3. P. 122–128.
<https://doi.org/10.1177/096369351802700305>
9. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимерабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 106–108.
10. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава BT8-M // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2012. № 2. С. 87–90.
11. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке дисковыми абразивными щетками // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2009. № 8. С. 130–134.
12. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 1. С. 75–79.
13. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 533–537.
14. Чапышев А.П., Стародубцева Д.А. Программный модуль назначения режимов финишной обработки с применением автоматических щеточных стационарных установок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18. № 2. С. 21–37.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.02>
15. Xiaojun Wu, Zhu Chen, Tianze Zhou, Changjie Ma, Xiao Shu, Jianyuan Dong. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives // Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 54. Issue 1. P. 171–177.
<https://doi.org/10.3901/JME.2018.01.171>
16. Xiao-Jun Wu, Tian-Ze Zhou, Zhi-Xue Tong. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2017. Vol. 14. No. 11. P. 5372–5377.
<https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6954>
17. Yuan Julong, Zhe Wu, Binghai L(U), Ducnam Nguyen, Huizong Lu, Ping Zhao. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface // Journal of Mechanical Engineering. 2012. Vol. 48. Issue 23. P. 167–177.
18. Яковлев Д.П., Пини Б.Е. О взаимодействии волокон абразивно-полимерных щеток с обрабатываемой поверхностью // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2009. № 2. С. 184–187.
19. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
20. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными процессами. М.: Наука, 1973. 448 с.
21. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем / пер. с англ. И.Ф. Шахнова. М.: Мир, 1973. 344 с.
22. Новоселов Ю.К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
23. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ / пер. с англ. М.: Мир, 1987. 480 с.



References

1. Abrashkevych Yu, Machyshyn G. Effective use of the polymer-abrasive brush. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2016;73:59–62.
2. Dimov YuV, Podashev DB. Studying surface quality under edge rounding by polymeric and abrasive brushes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):23–34. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-23-34>
3. Dimov YuV, Podashev DB. Research of productivity of edge fillet process by polymer abrasive brushes. *Vestnik mashinostroeniya*. 2017;3:74–78. (In Russ.)
4. D'yakonov AA, Shipulin LV. Selecting the cutting conditions for plane grinding by the wheel periphery. *Russian Engineering Research*. 2014;34(12):814–816.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X14120119>
5. Dyadya SI, Gonchar NV, Stepanov DN, Chernyi VI, Alekseenko OV. Validation of the polymer-abrasive fibers selection for finishing operations procession. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni = New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2010;2:145–148.
6. Fomin AA, Gusev VG, Sattarova ZG. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. *Solid State Phenomena*. 2018;284:281–288.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281>
7. Fomin AA. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cut-ting control system. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076117>
8. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone GEL/SiC composites for elastic abrasive. *Advanced Composites Letters*. 2018;27(3):122–128.
<https://doi.org/10.1177/096369351802700305>
9. Provolotcky A, Negrub S. Using polymer-abrasive elastic tools for finishing operations *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2006;33:106–108.
10. Stepanov DN. Influence of polymer-abrasive tool parameters and method of processing on the roughness of titanium alloy BT8-M surface. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni = New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2012;2:87–90.
11. Ustinovich DF. Experimental study of flat surface quality when machining by disk abrasive brushes. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'*. 2009;8:130–134.
12. Ustinovich DF, Pribylsky VI. Effect of processing conditions on power of grinding by polymeric-abrasive disk brushes. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2012;1:75–79.
13. Chapyshev AP, Ivanova AV, Kryuchkin AV. Technological capabilities of processes of details mechanized finishing processing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6):533–537. (In Russ.)
14. Chapyshev AP, Starodubtseva DA. The program module designated processing conditions finishing employing automatic brushing stationary installation. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanical Engineering, Materials Science*. 2016;18(2):21–37.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.02>
15. Xiaojun Wu, Zhu Chen, Tianze Zhou, Changjie Ma, Xiao Shu, Jianyuan Dong. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives. *Journal of Mechanical Engineering*. 2018;54(1):171–177.
<https://doi.org/10.3901/JME.2018.01.171>
16. Xiao-Jun Wu, Tian-Ze Zhou, Zhi-Xue Tong. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel. *Journal of Computational and Theoretical Nano-science*. 2017;14(11):5372–5377.
<https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6954>
17. Yuan Julong, Zhe Wu, Binghai L(U), Ducnam Nguyen, Huizong Lu, Ping Zhao. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface. *Journal of Mechanical Engineering*. 2012;48(23):167–177.
18. Yakovlev DR, Pini BE. On the issue of interaction between the abrasive polymer brush's fiber and the treating surfaces. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta MAMI = Izvestiya MGTU MAMI*. 2009;2:184–187. (In Russ.)
19. Buslenko NP. Modeling of complex systems. Moscow: Nauka; 1978, 400 p. (In Russ.)
20. Boltianskiy VG. *Optimal control of discrete processes*. Moscow: Nauka; 1973, 448 p. (In Russ.)
21. Mesarovich M, Mako D, Takahara I. Theory of hierarchical, multilevel, systems. 1973, 344 p. (Russ. ed.: *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem*. Moscow, Mir, 1973, 344 p.)
22. Novoselov YuK. Surface formation dynamics under abrasive treatment. Sevastopol: Sevastopol National Technical University; 2012, 304 p.
23. Astrom K, Wittenmark B. Computer-controlled systems, 1987, 480 p. (Russ. ed.: *Sistemy upravleniya s elektronno-vychislitel'noj mashinoy*, Moscow, Mir, 1987, 480 p.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Димов Юрий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dimov-ura@yandex.ru

Подашев Дмитрий Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования и стандартизации
в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: dbp90@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.03.2020; одобрена после рецензирования 14.09.2020; принята к публикации 21.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Dimov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Designing
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dimov-ura@yandex.ru

Dmitry B. Podashev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Designing
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: dbp90@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 27.03.2020; approved after reviewing 14.09.2020; accepted for publication 21.12.2020.