



Оригинальная статья / Original article

УДК 621. 923: 621.922

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-977-992>

Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 1

© Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – создание системы управления качеством кромок при финишной обработке деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами, которые эффективны при зачистке поверхностей и скруглении кромок деталей. Использован принцип системного подхода для формализованного описания системы с наличием взаимосвязи между образующими ее подсистемами. Рассмотрена система управления проектированием данных операций финишной обработки с целью обеспечения требуемого качества (по шероховатости поверхностей, размерам и геометрической точности кромок) с оптимальной производительностью процесса при большом разнообразии конструкций инструментов и форм обрабатываемых поверхностей и их взаимного расположения. Система включает в себя входные параметры, пространство состояний (подпрограммы) и выходные данные. Входными параметрами системы являются оборудование, заготовка и инструмент, в пространство состояний входят подсистемы математических моделей взаимодействия инструмента с поверхностью и сил, на базе которых действуют математические модели съема материала, формирования шероховатости, расхода электроэнергии, износа инструмента и температуры в зоне резания. Информация из этих подсистем передается в подсистему оптимизации параметров операции финишной обработки. Приведен алгоритм проектирования технологической операции финишной обработки, состоящий из ввода в систему входных данных, анализа функциональных возможностей операции, решения о возможности изменения исходных данных, формирования управляющего воздействия, проектирования операции, организации подготовки к выполнению операции, контроля результатов выполнения операции на соответствие требованиям нормативно-технической документации и внедрения ее в серийное производство. Разработанная система в результате выполнения своих функций выдает оптимальные инструмент и режимы обработки. При реализации этой информации в технологическом процессе изготовления детали обеспечиваются требуемые показатели качества (по шероховатости поверхностей, размерам и геометрической точности кромок) с оптимальной производительностью процесса.

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

Информация о статье: поступила в редакцию 27 марта 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 28 августа 2020 г.; принята к публикации 30 октября 2020 г.

Для цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 1. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 977–992. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-977-992>

Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 1

Yury V. Dimov, Dmitry B. Podashev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to create a control system of edge quality under finishing machining of parts by elastic polymer abrasive tools, which are effective in surface conditioning and rounding of part edges. The principle of the system approach is used for a formalized description of the system characterized by the mutual interaction between the subsystems that form it. Consideration is given to the control system of these finishing operations design in order to ensure the required quality (in terms of surface roughness, size and geometric accuracy of edges) and optimal process performance under a large variety of tool designs and shapes of the processed surfaces and their mutual arrangement. The system includes input parameters, state space (subroutines) and output data. The input parameters of the system

include equipment, workpiece and tool. The state space includes subsystems of mathematical interaction models of tool and surface and forces on the basis of which the mathematical models of material removal, roughness formation, power consumption, tool wear, and cutting zone temperature operate. The information from these subsystems is transmitted to the subsystem for optimizing finishing operation parameters. An algorithm for designing finishing technological operations is presented. It consists of source data input to the system, analysis of operation functional capability, decisions on the possibility of changes in the input data, control action formation, designing of operation, organization of preparation for operation execution, control of operation execution results for the compliance with the requirements of normative and technical documentation and finishing operation implementation in mass production. The developed system provides optimal tools and processing modes as a result of fulfillment of its functions. When this information is implemented in the manufacturing process of parts, the required quality indicators (surface roughness, size and geometric accuracy of edges) are provided as well as the optimal process performance.

Keywords: finish machining, optimal control system, elastic instrument, required quality, optimum performance

Information about the article: Received March 27, 2020; revised August 28, 2020; accepted for publication on October 30, 2020.

For citation: Dimov YuV, Podashev DB. Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):977–992. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-977-992>

ВВЕДЕНИЕ

Финишная обработка деталей по зачистке поверхностей с целью уменьшения параметров шероховатости, устранения дефектов на поверхностном слое от предыдущей операции, удаления заусенцев и скругления кромок может эффективно осуществляться вращающимися абразивными инструментами. Этому вопросу посвящен ряд работ [1–18].

Для изучения и эффективного применения системы управления финишной обработкой полимерно-абразивными инструментами необходим системный подход¹ по анализу заданной проблемной ситуации. При этом система, на основе которой будет решаться проблема, является сложным объектом, который имеет свои элементы и связи, функции и подфункции, в том числе существующие в надсистеме и окружающей среде.

Решение задачи целесообразно проводить при моделировании анализируемого объекта в форме доступной для введения информации в систему управления (описание, математическое представление в виде аналитических и эмпирических зависимостей).

Целью системного анализа технологической операции является разработка единого методологического подхода к проектированию операции финишной обработки полимерно-абразивными инструментами по обес-

печению требуемого качества (по шероховатости поверхностей, размерам и геометрической точности кромок) с оптимальной производительностью процесса при большом разнообразии конструкций инструментов (щеточки радиальные и торцевые разнообразной конструкции и зернистости), форм обрабатываемых поверхностей (плоские и цилиндрические поверхности, кромки) и их взаимного расположения. При этом оптимальной производительностью следует считать такую производительность процесса обработки, при которой обеспечиваются все требования нормативно-технической документации (НТД) к качеству обработки при минимальной себестоимости выполнения операции и наличии ограничительных функций.

Процесс формирования обработанной поверхности необходимо рассматривать в континуальной среде, когда все точки пространства объемного твердого тела обладают одинаковыми физическими и химическими свойствами. Поэтому разрабатываемая система управления процессом финишной обработки будет являться «континуальной системой», формируемой на основе непрерывных (континуальных) сред (физических полей), свойства которых определяются физикой процессов и в общем виде выполняют операцию пространственно-временного фун-

¹Музыкин С.Н., Родионова Ю.М. Системный анализ: учеб. пособ. М.: Изд-во МГАПИ, 2003. 199 с.



ционального преобразования сигналов.

Любое научное исследование связано с установлением зависимости: воздействие – результат. Воздействие подается на вход объекта (системы), результат фиксируется на выходе. При этом вся система оптимального управления, как отмечено в работах [19–23], должна быть построена на использовании формализованного представления динамической системы в пространстве состояний.

Создаваемая система должна обладать такими свойствами как достижимость (управляемость), наблюдаемость (восстанавливаемость) и идентифицируемость. Она должна состоять из входных параметров, пространства состояния и выходных параметров.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В пространстве состояний динамические системы могут быть представлены в виде непрерывных дифференциальных или разностных уравнений.

Исходя из сформулированного вербального определения системы, можно дать формализованное описание системы Σ в виде упорядоченной пары¹:

$$\Sigma = (A, B),$$

где A – множество элементов (подсистем), образующих систему; B – множество отношений между элементами множества A .

Строгая однозначная зависимость между состоянием входа X и состоянием выхода Y выражается при помощи переходной функции

$$Y = R(X),$$

где R – оператор преобразования.

R -преобразования в рассматриваемой системе управления могут быть как детерминированными в Σ_1 -системах, так и стохастическими в Σ_2 -системах. Системы Σ с входными и выходными параметрами относятся к ориентированным (направленным) системам.

Если рассматривать разрабатываемую систему управления как обладающую иерархическими признаками, то такой системе присущи следующие характеристики:

– последовательное вертикальное расположение подсистем, образующих данную систему;

– приоритет действий подсистем верхнего уровня;

– зависимость действий подсистем верхнего уровня от исполнения нижними уровнями своих функций.

Ход реального процесса определяется требованиями к поведению системы на верхнем уровне. Для нормального функционирования системы на данном уровне необходимо, чтобы все нижние уровни работали правильно. Чем ниже производится спуск по иерархии, тем более точным и детальным становится раскрытие системы, при подъеме же вверх все более ясным представляется смысл и значение всей системы в целом.

Воздействие на систему подается на вход и складывается из факторов, приведенных на рис. 1.

Оборудование для данной операции выбирается по технологическим рекомендациям и в зависимости от наличия на производстве.

В качестве оборудования для зачистки поверхностей и скругления кромок могут использоваться станки с ЧПУ, промышленные роботы с установленными на них электрошпинделями, специально спроектированные станки, универсальные станки (фрезерные, плоско-шлифовальные, расточные и т. п.), а также шлифмашинки электрические или пневматические.

Следует отметить, что шлифмашинка в системе оптимального управления участвовать не может, так как при работе на ней управлять оптимизированными режимными параметрами невозможно.

Однако при отсутствии требуемого оборудования (производства бывают разного уровня оснащенности) применение полимерно-абразивных инструментов с использованием шлифмашинки взамен напильников, шарошек, шлифовальной шкурки и т.п. позволит повысить производительность труда и качество обработанной поверхности или кромки. Например, подобная полуручная обработка может дать неплохие результаты и в



Рис. 1. Входные параметры системы управления финишной обработкой
Fig. 1. Input parameters of finish machining control system

других сферах инженерной деятельности, например: кузовной ремонт автомобилей, строительство, деревообработка и т.д.

Заготовка характеризуется конструкцией (сочетание обрабатываемых поверхностей, их доступность для выполнения операции), материалом, из которого она изготовлена, и его свойствами (предел текучести, модуль упругости первого рода и механические свойства поверхностного слоя), а также теми операциями, которые предусмотрено выполнить (зачистка поверхностей, удаление заусенцев, скругление кромок) в соответствии с технологией изготовления детали.

Инструмент (эластичные полимерно-абразивные круги, радиальные и торцевые полимерно-абразивные щетки различной конструкции) назначается в зависимости от выполняемой операции в соответствии с технологическими рекомендациями и характеризуется следующими критериями:

- конструкцией инструмента;
- механическими свойствами материала связки, насыщенного абразивным зерном;
- модулем упругости первого рода;

- жесткостью;
- плотностью (в дальнейшем «модуль упругости», «жесткость», «плотность»);
- материалом зерна;
- зернистостью;
- температурой плавления связки инструмента;
- износостойкостью.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Система оптимального управления технологическими параметрами относится к сложной системе. Архитектура такой системы² складывается как из ее компонентов, так и из иерархических отношений между ними. Ее иерархическая структура состоит из взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, также разделены на подсистемы.

На рис. 2 приведена схема системы оптимального управления проектированием технологической операцией финишной обработки полимерно-абразивными инструментами.

Анализ системы заключается в функцио-



нальном, морфологическом и информационном ее описании, совокупность которых позволяет отразить главные свойства системы.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Функциональное описание исходит из того, что всякая система выполняет некоторые функции, отражающие ее параметры, процессы и иерархию. Функционал, количественно или качественно описывающий деятельность (действие) системы, называют *функционалом эффективности*.

Примем, что система Σ выполняет N функций: $1, 2, \Sigma_i, \dots, N$, зависящих от n -процессов $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$. Эффективность выполнения s -й функции можно представить в следующем виде²:

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_s(s) = \mathcal{E}(F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n) = \mathcal{E}_s(\{F_{ij}\}), \\ i = 1 \dots n, s = 1 \dots N.$$

Общая эффективность системы есть вектор-функционал $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_s\}$.

Многоуровневая иерархическая структура, к которой относится рассматриваемая система управления процессом финишной обработки, характеризуется следующими признаками:

- последовательное вертикальное расположение подсистем, образующих данную систему;
- приоритет действий подсистем верхнего уровня;
- зависимость действий подсистем верхнего от выполнения нижними уровнями своих функций.

Таким образом, вся система представляет собой некоторое семейство взаимодействующих между собой подсистем. К высшему уровню относится собственно система управления процессом финишной обработки.

В приведенной на рис. 2 схеме входными параметрами (система второго уровня) являются: оборудование, заготовка и инструмент, представленные на рис. 1.

При наличии нескольких конкурирующих инструментов выбор оптимального инструмента осуществляется в управляющей под-

системе «Оптимизация параметров операции финишной обработки».

Информация по входным параметрам поступает в системы третьего уровня: «Математическая модель силы» и «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью».

Силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью влияют на съем (производительность процесса), шероховатость обработанной поверхности, температуру в зоне резания, износ инструмента и мощность электродвигателя привода оборудования.

«Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» определяется характером обрабатываемой поверхности, свойствами инструмента и условиями их взаимодействия. Кроме того, «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» передает информацию в систему того же уровня – «Математическую модель силы».

Информация из системы третьего уровня «Математическая модель силы» и «Математическая модель взаимодействия инструмента с поверхностью» поступает в системы четвертого уровня: «Математическая модель съема», «Математическая модель шероховатости», «Математическая модель температуры», «Математическая модель износа» и «Математическая модель расхода электроэнергии».

У системы четвертого уровня «Математическая модель съема» есть подсистема «Оплата труда».

Идентификация моделей третьего и четвертого уровней связана с аппаратом формализации, используемым для описания систем. Выбор математического аппарата описания, в свою очередь, зависит от результатов идентификации, т.е. от того, насколько адекватна реальному объекту построенная по ее результатам модель.

Информация из всех систем четвертого уровня поступает в управляющую систему «Оптимизация параметров операции финиш-

²Заболеева-Зотова А.В. Введение в системологию: учеб. пособ. Волгоград: ВолгГТУ, 1999. 75 с.

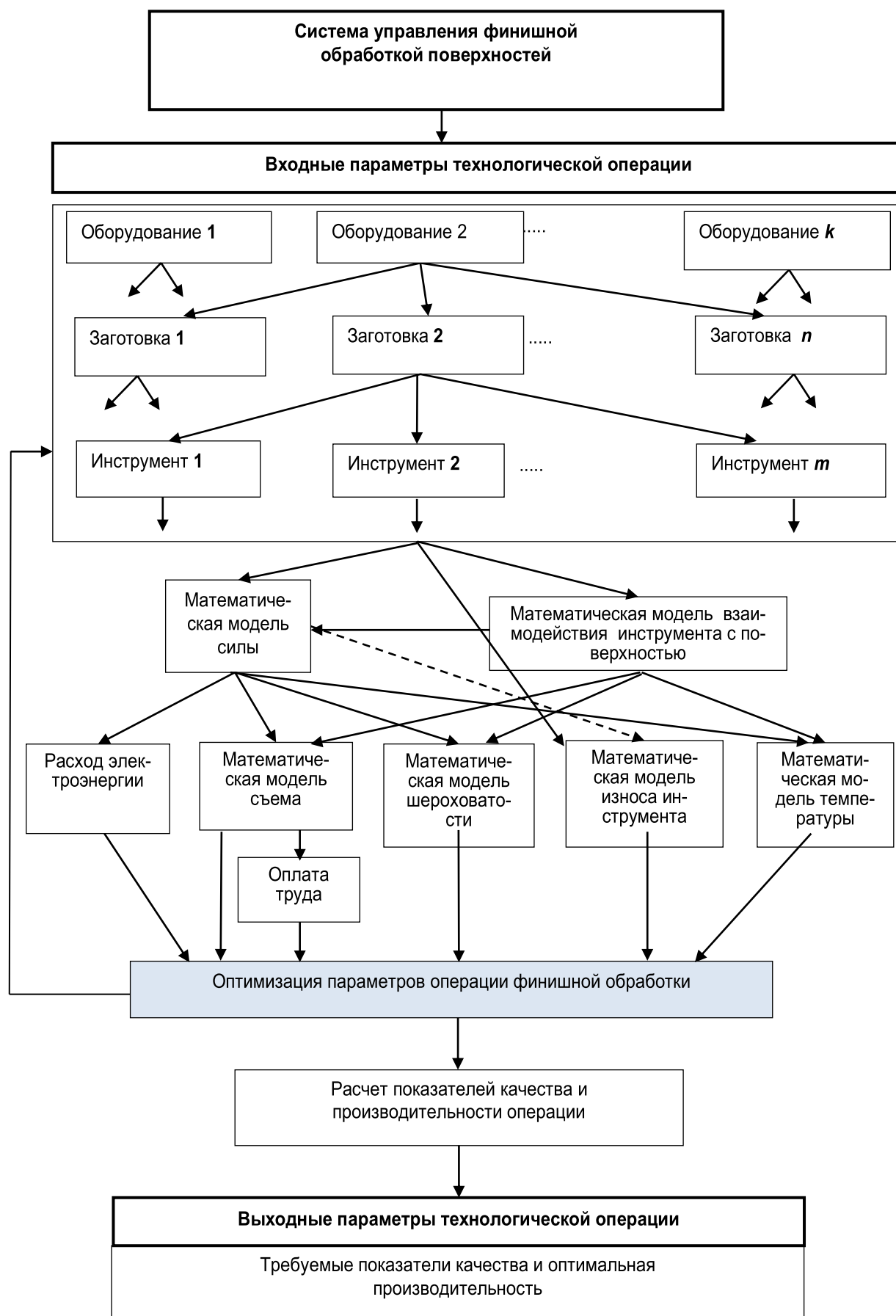


Рис. 2. Система управления финишной обработкой
 Fig. 2. Control system of finish machining



ной обработки», относящуюся к системе пятого уровня. Для выбора оптимального инструмента информация передается в систему второго уровня и процесс повторяется столько раз, сколько конкурирующих инструментов есть в наличии.

Полученная в результате выполнения своих функций система выдает оптимальные инструмент и режимы обработки. При реализации этой информации в технологическом процессе изготовления детали обеспечиваются требуемые показатели качества и оптимальная производительность.

Функциональные процессы в системе тесно связаны с информационными.

МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Морфологическое описание системы производится для создания представления об *основных свойствах системы*.

Морфологическое описание можно представить выражением²:

$$\Sigma = \{S_M, V_M, J_M, K_M\},$$

где $\Sigma = \{\Sigma_{ij}\}$ – множество элементов и их свойств; $V_M = \{V_{ij}\}$ – множество связей; J_M – структура; K_M – композиция.

Элементный состав – Σ . Под элементом в данном случае понимается подсистема, внутрь которой описание не проникает. Элементный состав (по данным¹) в системе оптимального управления финишной операцией (см. рис. 2) является *гетерогенным*, содержащим разнотипные подсистемы. По свойствам элементов (подсистем) эта система является: по содержанию – *информационной*; по степени самостоятельности – *программной*; по специализации – *разнотипной*; по времени – *регулярной*.

Связи в системе – V_M . Морфологические свойства системы существенно зависят от характера связей. В рассматриваемой системе заложены информационные связи, предназначенные для переноса информации от одного элемента к другому в соответствии с последовательностью выполняемых функций.

Применены связи *прямые* и *обратные*. Прямые связи предназначены для передачи

информации от систем высокого уровня к системам нижестоящего уровня. При этом качество связи определяется ее пропускной способностью и надежностью.

Обратные связи, действующие в рассматриваемой системе, имеют функцию управления процессами. Обратная связь предполагает некоторое преобразование компонента, поступающего по прямой связи, и передачу результата преобразования обратно, т.е. в направлении, противоположном функциональной последовательности (прямой связи) к одному из предыдущих элементов системы. Преобразование является тождественным (информации в информацию).

В рассматриваемой системе информация об оптимальном инструменте, выявленная в управляющей подсистеме «Оптимизация параметров операции финишной обработки» передается на вход системы (система первого уровня).

Информация, поступающая в системы разного уровня, может быть как детерминированной, так и стохастической.

Структура системы – J_M . Структурные свойства систем определяются характером и устойчивостью отношений между элементами.

В анализируемой системе устойчивость структуры *детерминированная*, в которой отношения либо неизменны, либо изменяются по некоторому закону. В данном случае, структура обладает свойством *включения* и *выключения* определенных элементов (при соответствующих условиях),

По характеру отношений между элементами структуры в рассматриваемой системе отношения являются смешанными из иерархических и многосвязных.

Композиция системы – K_M . Композиционные свойства систем определяются способом объединения элементов в подсистемы. В рассматриваемой системе заложены два вида композиционных свойств подсистем – *рецепторные* (способные преобразовывать внешнее воздействие в информационные сигналы, передавать и переносить информацию) и *рефлексивные* (способные воспроизводить внутри себя процессы на информационном уровне, генерировать информацию).

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Информационное описание должно давать представление об организации системы. Информация – это количественная мера устранения энтропии (неопределенности), мера организации системы. Отражающая реальную действительность информация может представлять собой: сведения, данные, сообщения и сигналы, подлежащие передаче рецепторными подсистемами, приему, обработке и хранению. Физически информация определяет предсказуемость свойств и поведения объекта во времени. Система позволяет предсказать, что выполнение операции финишной обработки по рассчитанным режимам и предлагаемым инструментом обеспечивает требуемое качество изделия и оптимальную производительность процесса.

Рассматриваемая система обладает информационным метаболизмом, который заключается в способности потреблять информацию из среды и сообщать информацию среде. Информация из среды поступает на входе по данным об оборудовании, заготовке и инструменте. Среде информация передается в виде рекомендуемых режимов обработки и инструменте.

Качество организации системы зависит от количества и ценности информации, которые являются взаимодополняющими категориями.

Связь между функциональным и информационным описаниями отражает эффективность и энтропию. Закон изменения эффективности от времени отражает энтропийные свойства. Связь между морфологическим и информационным описаниями отражает изменение морфологических свойств во времени.

Совокупность функционального, морфологического и информационного описаний позволяет отразить главные свойства систем.

УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ

Важной характеристикой большой системы является ее *устойчивость* при возникновении различного рода *возмущений*. Воздействие возмущений на систему может быть как в начальных состояниях и ее входах, так

и в самой ее структуре. Во всех этих случаях основным объектом анализа, как отмечено в работе¹, является поиск ответа на вопрос о том, существенно ли меняется поведение системы в результате происшедших нежелательных, незапланированных изменений. Кроме того, система должна обладать способностью *организованности* и *упорядоченности*, заключающихся в способности предсказуемости и функционирования на перспективу.

В качестве объекта исследования должны рассматриваться системы в пространстве состояний (подсистемы второго, третьего и четвертого уровней по рис. 2), задаваемые с помощью, например, дифференциального уравнения вида

$$\frac{dq(t)}{dt} = f(q, t), q(0) = q_0 = c,$$

где q – пространство состояний; t – время, или другие виды уравнений.

При входе из равновесия рассматриваемую систему могут вывести следующие возмущающие факторы:

- заготовка представлена с исходными показателями по входным параметрам, существенно отличающимися от показателей, введенных в систему;

- взаимное расположение поверхностей в заготовке не позволяет полностью реализовать финишную операцию полимерно-абразивными инструментами на всей поверхности;

- оборудование, имеющееся в наличии на производстве, не обладает требуемыми степенями свободы для реализации операции инструментами, рекомендуемыми для данной операции;

- инструмент отличается по своим эксплуатационным показателям от исследованного той же марки и введенной в систему.

Система управления позволяет минимизировать влияние приведенных возмущающих факторов путем:

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



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

3) назначения оборудования с расширенными технологическими возможностями или применения специально спроектированного оборудования.

Критерием результативности функционирования системы управления процессом финишной обработки будем считать обеспечение стабильности выходных показателей для различных зон обрабатываемых поверхностей в пределах, установленных НТД.

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ

Алгоритм последовательности действий при проектировании технологической операции представлен на рис. 3. Как уже было отмечено выше, процесс проектирования начинается с ввода в систему входных данных (на схеме блок 1).

Финишная обработка полимерно-абразивными инструментами, как и любой другой вид обработки, обладает определенными ограничениями в функциональных возможностях.

Блок 2 предусмотрен для проведения такого анализа. Если функциональные возможности не препятствуют реализации данной операции (блок 3), то информация передается на блок 6 для проектирования операции. Если реализация невозможна, информация передается на блок 4, где решается вопрос о передаче информации на блок 5 для формирования управляющего воздействия или об отказе от дальнейшего проектирования операции.

На стадии формирования управляющего воздействия (блок 5) принимается решение об изменении входных параметров по оборудованию, заготовке и инструменту, которые передаются в блок 1.

Проектирование операции (блок 6) заключается в вводе входных параметров и в выполнении всех предусмотренных функций в пространстве состояний в подсистемах второго и третьего уровней. Особая роль в си-

стеме управления отводится управляющей подсистеме «Оптимизация параметров операции финишной обработки».

Оптимизация процесса выполнения операции, предусмотренная в блоке 6, заключается в выборе экономически оптимальных инструмента и режимов обработки и разрабатывается на основе математических моделей (полученных аналитическим или эмпирическим путем):

- производительности процесса обработки;
- формирования поверхностного слоя по шероховатости;
- износа инструмента;
- температуры в зоне резания.

При этом учитываются затраты на оплату труда, расход электроэнергии и стоимость полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции.

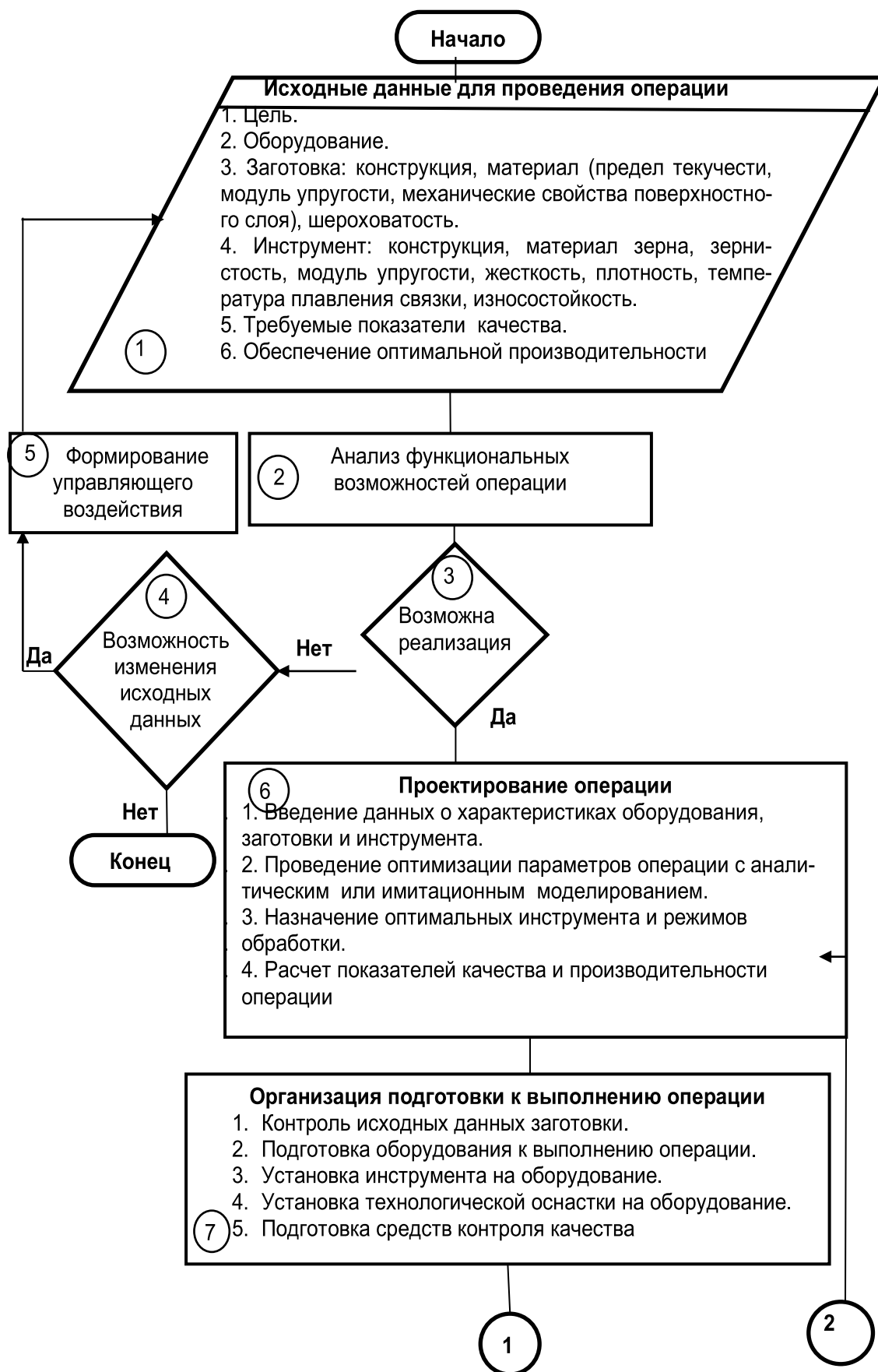
В результате оптимизации определяются оптимальные режимы обработки и наиболее выгодный для применения инструмент.

В связи с тем, что значения большинства входных параметров являются стохастическими, результаты выполнения операции на рассчитанных оптимальных режимах и инструменте могут оказаться не соответствующими требованиям НТД. Поэтому в системе предусмотрено проведение пробной обработки (блоки 7 и 8). В случае отклонений от требований НТД: по блокам 9 и 10 проводится анализ видов дефектов и причин их возникновения (блок 11) с последующим управляющим воздействием на параметры обработки.

Внедрение спроектированной операции финишной обработки в серийное производство (блок 12) должно происходить только при полной уверенности в обеспечении выпуска качественной продукции.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ

Поскольку любой из показателей качества после обработки полимерно-абразивными инструментами является случайной величиной, распределенной в соответствии с вероятностным законом, оценку правильности выполнения операции необходимо производить по доверительным границам рассмат-



а

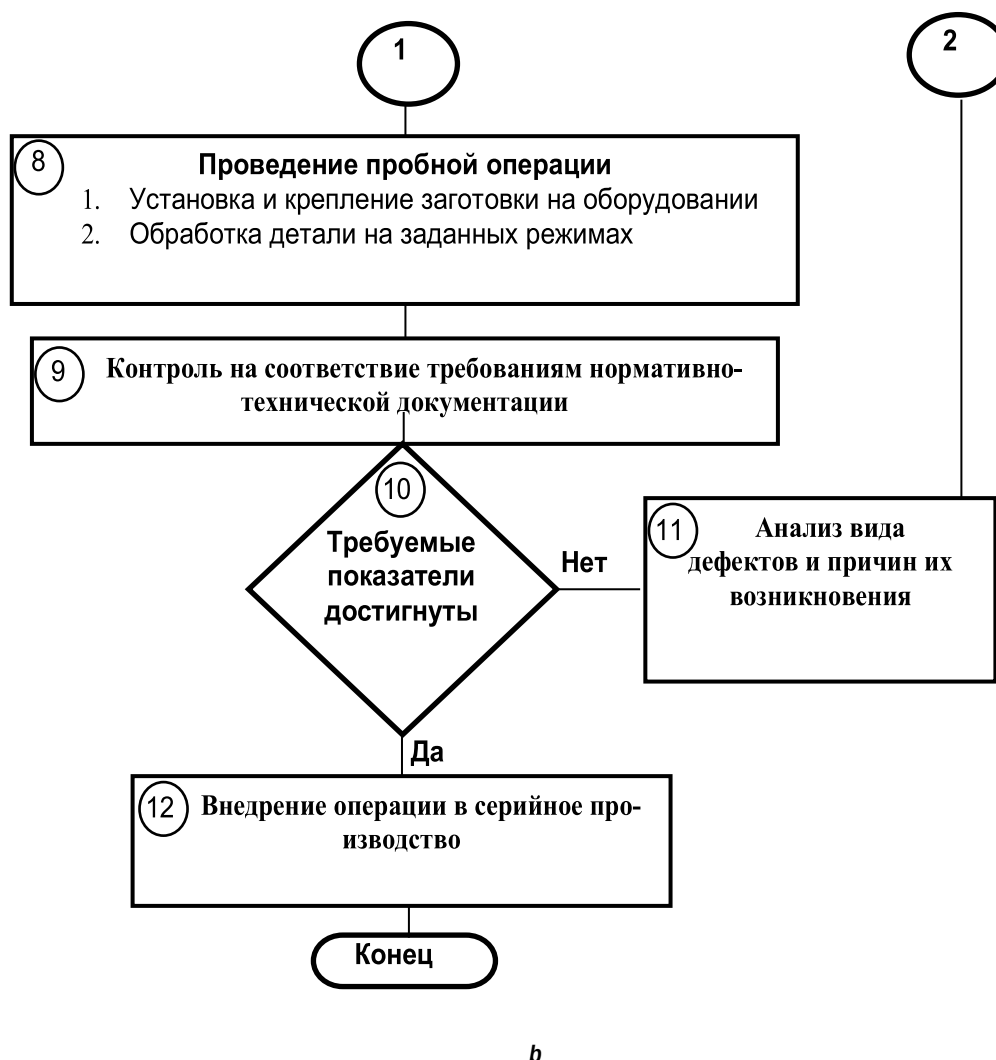


Рис. 3. Алгоритм проектирования технологической операции финишной обработки: а – начало; б – окончание
Fig. 3. Algorithm of finishing technological operation design: a – start; b – end

риваемого параметра. При этом входные параметры элементов системы имеют как стохастический, так и детерминированный характер.

К вектору входных параметров со стохастическими показателями относятся: по заготовке – исходная шероховатость поверхности, размер и форма заусенца на кромке; по инструменту – параметры режущего микрорельефа, свойства связи; по режимам обработки – неточность введения рассчитанных по системе управления режимных параметров.

К параметрам с детерминированными характеристиками следует отнести данные по оборудованию (частота вращения шпинделя, подача, средства базирования и крепления заготовки).

Оценка соответствия выходных параметров обработки требованиям НТД может осуществляться двумя методами:

– первый метод заключается в *прогнозировании* доверительных границ каждого выходного параметра на основе анализа влияния входных параметров и установлении доверительных границ погрешности оценки;

– второй метод основан на использовании результатов контроля *фактических значений* выходных параметров по блоку «Контроль на соответствие требованиям НТД» (см. рис. 3).

Прогнозирование доверительных границ. Распределение внутри границ этих составляющих рассматриваются как распределение случайных величин. При отсутствии данных о виде распределения, по³ рекомен-

дуется принимать как равномерное распределение.

Доверительные границы показателей качества в результате выполнения операции Θ_{Σ} вычисляются путем построения композиции для каждого показателя качества. При равномерном распределении доверительные границы вычисляются по формуле:

$$\Theta_{\Sigma} = \pm k_1 \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m X_j^2},$$

где X_j – граница j -й составляющей входного параметра (исходная шероховатость, микрорельеф режущей поверхности инструмента, вид абразивного зерна, связка абразивного инструмента, положение инструмента относительно обрабатываемой поверхности); k_1 – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью P и числом m составляющих входных показателей и их соотношением между собой.

Для доверительной вероятности $P = 0,95$, коэффициент k_1 пренебрежимо мало зависит от числа составляющих входных показателей X_j и их соотношения, поэтому при указанной доверительной вероятности коэффициент k_1 принимается равным 1,1.

Доверительные границы погрешности оценки выходного параметра находятся путем построения композиции распределений случайных погрешностей и оцениваемого показателя качества, рассматриваемых как случайные величины. Границы погрешности оцениваемой величины Δ (без учета знака) вычисляются по формуле:

$$\Delta = \pm K_1 \cdot S_{\Sigma},$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от закона распределения стохастических входящих величин и принятой доверительной вероятности; при числе наблюдений $n < 30$ в⁴ рекомендуется использовать коэффициент Стьюдента.

S_{Σ} – суммарное среднее квадратичное отклонение стохастических входных величин для каждого выходного показателя операции:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(S_i \cdot \frac{\partial X_j}{\partial x_i} \right)^2},$$

где S_i – среднее квадратичное отклонение i -го стохастического входного параметра, влияющего на рассматриваемый показатель качества; $\frac{\partial X_j}{\partial x_i}$ – передаточное отношение (коэффициент влияния) на функцию X_j параметра x_i , влияющего на показатель качества.

Оценка по фактическим значениям выходных параметров. По блоку «Контроль на соответствие требованиям НТД» проводится следующими способами:

1. При однократном измерении: запланированными средствами измерений и сопоставлением с допустимыми значениями измеряемого параметра.

2. При многократном измерении: согласно литературному источнику⁴, предусматривается исключение грубых промахов с использованием критерия Граббса и определение доверительных границ случайной погрешности.

Статистический критерий Граббса исключения грубых погрешностей основан на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению. Для этого вычисляют критерии Граббса G_I и G_{II} , предполагая, что наибольший $x_{\max}$ и наименьший $x_{\min}$ результат измерений вызван грубыми погрешностями: $G_I = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{s}$; $G_{II} = \frac{|\bar{x} - x_{\min}|}{s}$.

Сравнивают G_I и G_{II} с теоретическим значением G_T критерия Граббса при выбранном уровне значимости P . Таблица критических значений критерия Граббса приведена в приложении А в³. Если $G_I > G_T$, то $x_{\max}$ исключают как маловероятное значение. Если $G_{II} > G_T$, то $x_{\min}$ исключают как маловероятное значение.

³ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения, перераб. в 2019 г. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.

⁴Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. М.: Изд-во стандартов, 1991. 79 с.

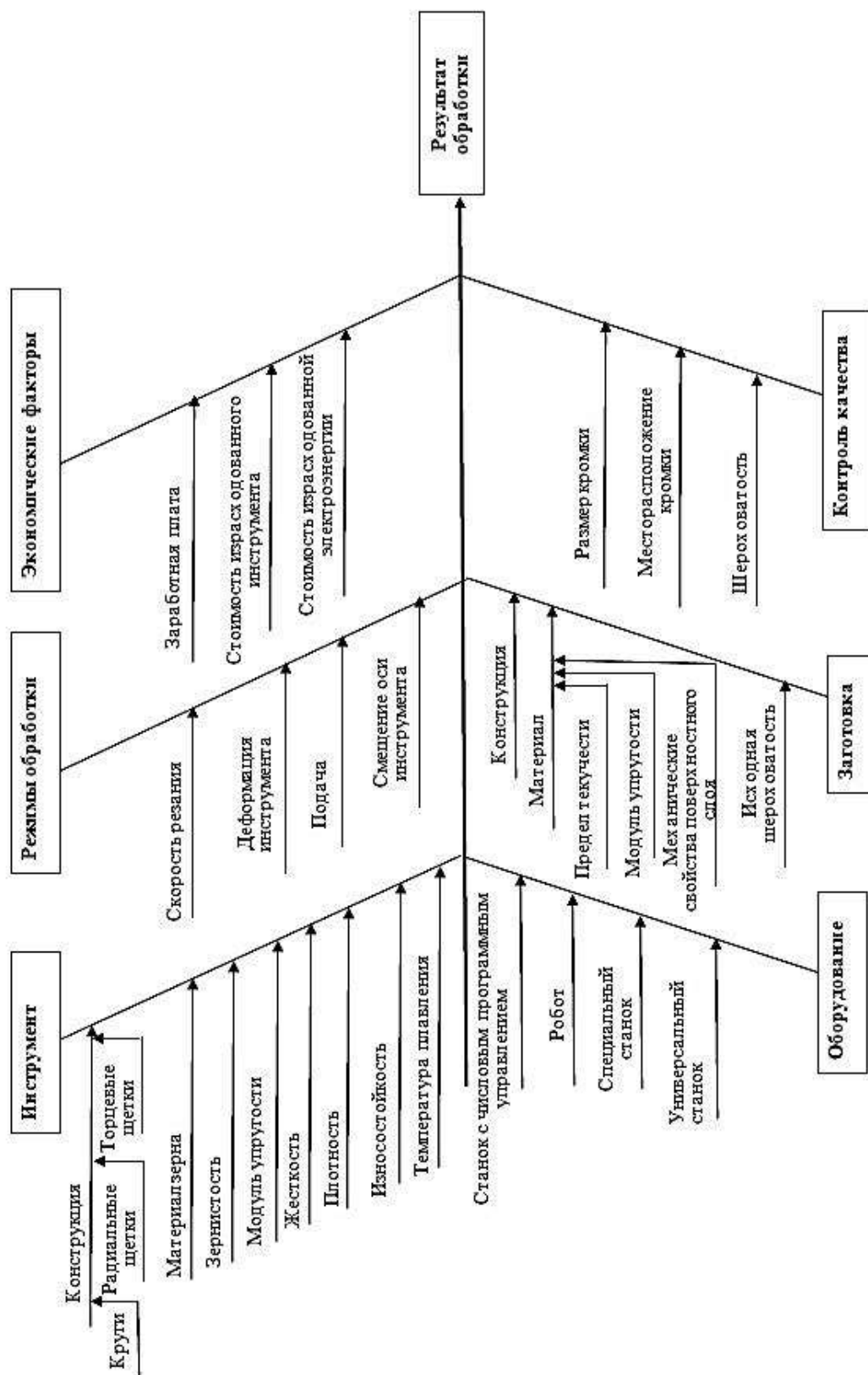


Рис. 4. Причинно-следственная диаграмма системы финишной обработки (схема Ишикавы)
Fig. 4. Casual diagram of finish machining system (Ishikawa diagram)

Среднее квадратичное отклонение S -группы, содержащей n результатов измерений, вычисляют по формуле: $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$.

Определение доверительных границ случайной погрешности. Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляют по формуле: $\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x}}$, где t – коэффициент Стьюдента; $S_{\bar{x}}$ – среднее квадратичное отклонение среднего арифметического: $S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$.

Выходной параметр обработки является годным, если его доверительные границы не выходят за пределы допустимых значений, регламентируемых НТД.

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Для стабильного обеспечения качества финишной обработки необходимо выявить все протекающие процессы и влияющие факторы.

Система управления качеством выходных параметров представлена на рис. 4 причинно-следственной диаграммой процесса финишной обработки (схема Исикавы), в кото-

рой приведены процессы и факторы, влияющие на качественное выполнение системы управления финишной обработкой.

Причинно-следственная диаграмма (схема Исикавы) предназначена для структурирования отношений между некоторым заранее определенным показателем качества и множеством факторов, которые могут влиять на этот показатель.

В диаграмме выделены главные причины, влияющие на данный показатель качества: оборудование, заготовка, инструмент, режимы обработки, а также главные факторы, обеспечивающие выпуск качественной и экономически оптимальной продукции: контроль качества и экономические факторы.

Затем выделены вторичные причины (факторы), влияющие на главные (факторы 2-го уровня) и факторы 3-го уровня, влияющие на факторы 2-го уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения своих функций разработанная система выдает оптимальные инструмент и режимы обработки. При реализации этой информации в технологическом процессе изготовления детали обеспечиваются требуемые показатели качества и оптимальная производительность.

Библиографический список

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. 2016. Т. 20. № 9. 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. 2017. № 3. 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 convex 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., Нергуб С.Л. Использование полимераабразивного 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.Р., 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 tekhnicheskogo 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 tekhnologii 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 cutting 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 abra-sive. *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 tekhnologii v metalurgii ta ma-shinobuduvanni = 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. Experi-

- mental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 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 tekhnicheskogo 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. Boltanskiy 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.)

Критерии авторства

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Authorship criteria

Dimov Yu.V., Podashev D.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

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