

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.923.4
doi: 10.30987/2782-5957-2022-8-22-32

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕЙ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Леонид Григорьевич Вайнер^{1,3✉}, Максим Николаевич Нагоркин², Максим Максимович Максимов^{1,4}

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

² Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

³ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

¹ lgvainer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

² nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

⁴ 004171@pnu.edu.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке методологических основ создания цифровой модели процесса двусторонней торцешлифовальной обработки. Цель исследований – повышение эффективности технологической подготовки операции двустороннего шлифования торцов в условиях автоматизации и цифровизации производства. На современном этапе развития машиностроения и информатизации производства технологические параметры наладки и режимов резания металлообрабатывающих систем должны определяться не из справочных данных, а в результате имитационного моделирования процессов обработки с учетом совокупности актуальных технологических факторов влияния. Задача, решению которой посвящена статья – поиск решения проблем обеспечения корректности разрабатываемых математических и компьютерных моделей, адекватного учета доминирующих факторов, корректного представления в цифровом отображении процесса обработки имеющих место закономерностей, связей и ограничений на основе методов структурно-параметрического анализа и имитационного моделирования. Данные проблемы могут быть решены только на основе системного подхода к данному процессу обработки и разработки методологических основ создания ее цифровой модели, что и является предметом исследований в пред-

ставленных материалах применительно к двусторонней торцешлифовальной обработке (ТО). Предложенные: алгоритм структурно-параметрического проектирования ТО, структурно-функциональная модель процесса формообразования заготовки, объекты и связи пространства технологического взаимодействия при ТО, которые в совокупности являются методологической основой для виртуального представления ТО, обладают признаками научной новизны. Результаты виртуальной ТО и шлифования в производственных условиях цилиндрических роликов при найденных на основе изложенных методических рекомендаций технологических параметрах настройки станка показывают, что требуемые значения доминирующих погрешностей формы и взаимного положения обрабатываемых поверхностей обеспечиваются в заданных пределах. Выводы: изложенные в статье положения и модельная среда могут быть использованы при разработке автоматизированной системы технологической подготовки ТО в условиях цифрового производства.

Ключевые слова: обработка, проектирование, параметры, модель, систематизация, методология, синтез.

Ссылка для цитирования:

Вайнер Л.Г. Методологические аспекты проектирования цифровой модели процесса двусторонней торцешлифовальной обработки / Л.Г. Вайнер, М.Н. Нагоркин, М.М. Максимов // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 8. – С. 22 – 32. doi: 10.30987/2782-5957-2022-8-22-32.

Original article
Open Access Article

METHODOLOGICAL ASPECTS OF DESIGNING A DIGITAL MODEL OF TWO-SIDED FACE GRINDING TREATMENT

Leonid Grigoryevich Vayner^{1,3✉}, Maksim Nikolaevich Nagorkin², Maksim Maksimovich Maksimov^{1,4}

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia

² Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

³ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

¹ lgvainer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

² nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

⁴ 004171@pnu.edu.ru

Abstract

The paper is devoted to the development of methodological foundations of digital models of two-sided face grinding treatment. The study objective is further increase in the effectiveness of work preparation of two-sided face grinding in the conditions of automated and digital manufacture. At the present stage of the development of mechanical engineering and computerized manufacture the technological parameters of adjustment and cutting modes of metal-working systems should be determined not by reference data, but as a result of simulation modeling of treatment processes taking into account all actual technological factors of influence. The problem to which the paper is devoted is the search for solutions to the problems of ensuring the correctness of mathematical and computer models being developed, adequate consideration of dominant factors, correct representation in the digital form of treatment process of patterns, relationships and constraints taking place based on the methods of structural parametric analysis and simulation modeling. These problems can be solved only on the basis of a systematic approach to the treatment and

the development of methodological foundations for creating its digital model, which is the subject of research in the presented paper in relation to two-sided face treatment (FT). The following things are proposed: an algorithm of structural and parametric FT design, a structural and functional model of workpiece forming, objects and connections of technological interaction in FT, which together are the methodological foundations for the virtual FT presentation and have signs of scientific novelty. The results of virtual FT of cylindrical rollers in production conditions and the technical settings of the machine found on the basis of the stated methodological recommendations show that the required values of the dominant shape errors and the relative position of the treated surfaces are provided within the specified constraints. Conclusions: the provisions given in the paper and the model environment can be used in the development of an automated system for technological FT preparation in the conditions of digital production.

Keywords: treatment, designing, parameter, model, systematization, methodology, synthesis.

Reference for citing:

Vayner LG, Nagorkin MN, Maksimov MM. Methodological aspects of designing a digital model of two-sided face grinding treatment. *Transport Engineering*. 2022; 8: 22 – 32. doi: 10.30987/2782-5957-2022-8-22-32.

Введение

Происходящая в настоящее время перезагрузка российской промышленности требует возрождения отечественного машиностроительного производства на новом – цифровом витке его развития. Разработка обобщенных методов имитационного моделирования формообразующих технологических воздействий позволит повысить эффективность управления технологическими системами механической обработки для обеспечения требуемых выходных показателей качества обрабатываемых деталей.

На современном этапе развития машиностроения и информационных технологий методология проектирования технологической операции механической обработки кардинально меняется – от принципа аналогов (использование баз данных с усредненными значениями технологиче-

ских параметров в зависимости от усредненных условий обработки) к поиску оптимальных значений параметров в зависимости от совокупности актуальных технологических факторов влияния.

Поскольку в автоматизированных системах технологической подготовки производства технологические параметры настройки и режимов металлообрабатывающей системы определяются в результате моделирования процесса обработки, одной из ключевых проблем становится проблема корректности разрабатываемых математических и компьютерных моделей, адекватный учет доминирующих факторов, корректное представление в цифровом отображении процесса обработки имеющих место закономерностей, связей и ограничений. Данная проблема может быть решена только на основе системного

подхода к данному процессу обработки и разработки методологических основ создания ее цифровой модели.

Предлагаемые большинством авторов обобщенные методы анализа и синтеза механических технологических систем ограничиваются, как правило, рассмотрением номинальных движений инструмента и заготовки, что может служить методологической базой, но представляет лишь теоретический интерес и не может быть основой для реалистичной цифровой модели процесса [1-3]. Далее рассмотрены методологические аспекты, обобщенные подходы к моделированию технологической операции двусторонней торцешлифоваль-

ной обработки (ТО) с учетом действия доминирующих геометро-кинематических, упруго-силовых, тепловых факторов.

Проектирование технологического процесса механической обработки включает в себя поиск и оптимизацию следующих массивов данных: режимы обработки, параметры наладки станка, геометрические и физико-механические характеристики инструментов. При проектировании процесса ТО необходимо учитывать как общие закономерности процесса шлифования, так и специфические системные особенности поточной обработки деталей на двусторонних торцешлифовальных станках [4].

Алгоритмы и модели, используемые при проектировании цифрового образа процесса ТО

Наиболее обобщенной формой представления технологической операции является её функциональная модель [5, 6], как разновидность модели «чёрного ящика» в терминологии общей теории систем, в которой выделяют (рис. 1): входные $A_1 - A_k$ и выходные $B_1 - B_k$ параметры – характеристики качества обрабатываемой поверхности детали и физико-механических свойств материала заготовки; $(C_1 - C_k)$ – управляющие переменные параметры; $(D_1 - D_k)$ – постоянные параметры технологической системы (число параметров $k =$

var для каждой группы параметров). Деление параметров на постоянные и переменные достаточно условно и зависит от конкретной постановки задачи проектирования.

Значения допустимых пределов контролируемых геометрических характеристик ($B_1 - B_k$) поверхности заготовки, обрабатываемой на данной операции, могут быть определены в результате моделирования формирования показателей надежности технологического процесса изготовления детали [7 – 9].

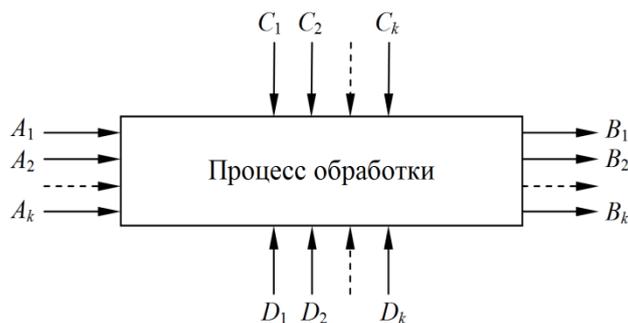


Рис. 1. Модель технологической операции в функциональном виде
 Fig. 1. A model of a technological operation in a functional form

На рис. 2 представлен алгоритм проектирования технологической операции в обобщенном виде. Входными параметрами процесса проектирования являются показатели точности и значения геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя детали $B_1 - B_k$,

полученных после выполнения технологической операции.

При проектировании процесса обработки решается задача синтеза технологических параметров на основе совокупности предъявляемых к данной технологической операции критериев качества. Найденные

проектные параметры целесообразно классифицировать в соответствии с функциональной моделью.

В результате определяются вариации массивов переменных: $(A_1 - A_k)$, $(C_1 - C_k)$, $(D_1 - D_k)$.

При этом, как правило, используется несколько критериев, поэтому решение представляет собой совокупность техноло-

гических параметров, найденных с помощью методов многокритериальной оптимизации. Решение задачи можно упростить вводом допущений и ограничений, таких как уменьшение количества переменных параметров и ранжирование критериев качества процесса обработки с выделением главного и вспомогательных критериев.



Рис. 2. Алгоритм проектирования технологической операции в обобщенном виде
 Fig. 2. Algorithm for designing a technological operation in a generalized form

При проектировании цифрового образа механической обработки должно выполняться главное условие – все параметры технологической системы, процесса обработки и критериальные характеристики должны быть вычисляемы или определяемы из информационных баз данных в рамках специализированной модельной среды.

Основой для проектирования процесса обработки служит его структурно-функциональная модель, учитывающая взаимосвязь и взаимное влияние параметров и доминирующих факторов.

Рассмотрим особенности алгоритма проектирования и используемых моделей.

На рис. 3 представлен алгоритм структурно-параметрического проектирования цифрового образа торцешлифовальной обработки ($k = \text{var}$, $n = \text{var}$).

Блок 1 включает в себя требуемые параметры качества обработанной детали ($B_1 - B_k$).

Блок 2 связан с определением параметров технологической системы (ТС) с учетом особенностей операции поточного

двустороннего торцевого шлифования [4, 9]. Он включает в себя определение следующих информационных массивов и векторов: X_{i1} – характеристики реализуемой схемы шлифования (с круговой, возвратно-поступательной или прямолинейной траекторией подачи заготовок, закрепление заготовок или его отсутствие и др.); X_{i2} – характеристики реализуемой кинематики относительного движения заготовки и шлифовальных кругов (ШК) (принудительное вращение заготовок или вращение незакрепленных заготовок в гнездах диска-сепаратора, реализованный закон вращения заготовки в процессе обработки, относительное направление вращения оппозитных ШК и др.); X_{i3} – характеристики компоновки отдельных элементов цепи формообразования ТС (относительное расположение диска подачи и ШК, расположение узла правки ШК относительно шлифовальных бабок станка и др.); X_{i4} – параметры формы производящих поверхностей ШК (плоскость, коническая, параболическая); Y_{i8} – упругие характеристики ТС (значения приведенных к ШК осевой и по-

воротной жесткостей и др.); Y_{i10} – характеристики смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС).

Блок 3 определения параметров процесса обработки включает в себя: Y_{i5} – характеристики технологических режимов (скорость резания на периферии ШК, скорость подачи заготовок, значения снимаемого припуска за проход), Y_{i6} – параметры

наладки (геометрические характеристики траектории движения заготовок и др.); Y_{i7} – характеристики пространственного позиционирования ШК (угловые смещения ШК в горизонтальной и вертикальной плоскостях); Y_{i9} – физико-механические и энергетические характеристики ШК (твёрдость и зернистость ШК, удельная энергия шлифования и др.).

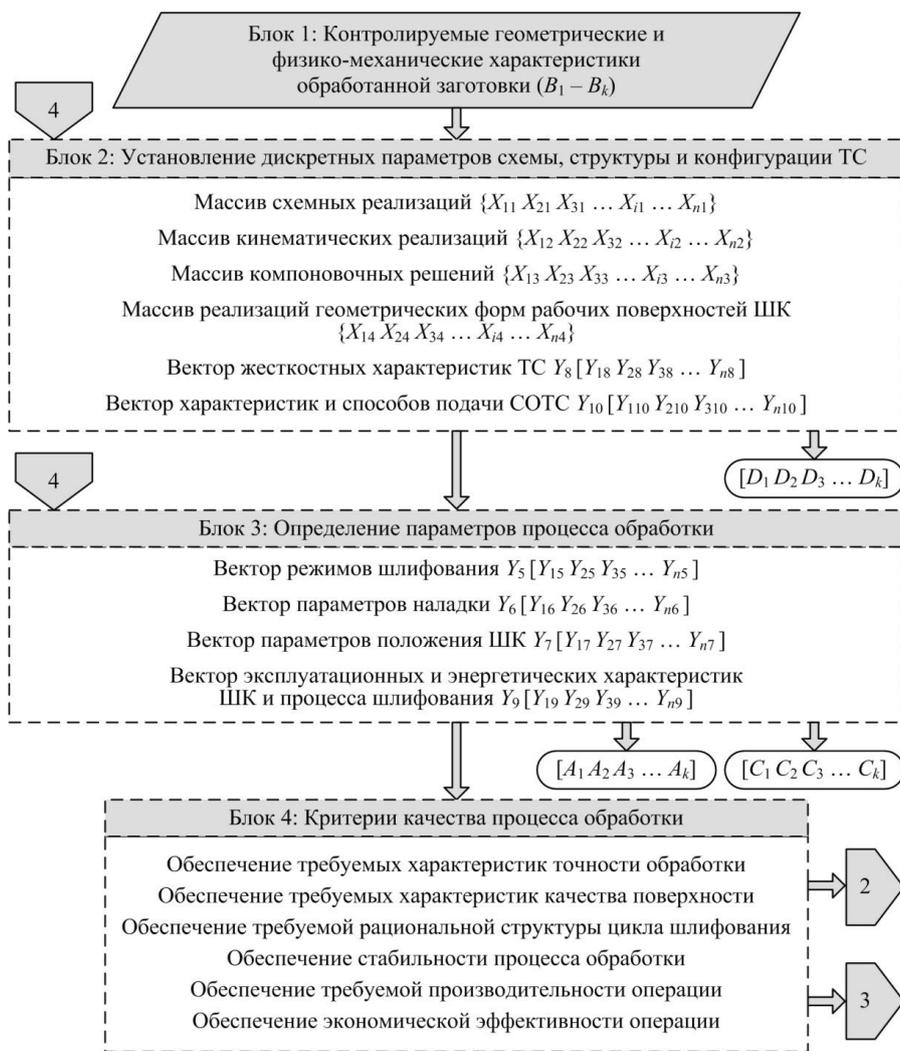


Рис. 3. Алгоритм структурно-параметрического проектирования ТО
 Fig. 3. Algorithm of structural-parametric design of face grinding

Блок 4 определяет главные и вспомогательные критерии качества технологической операции: выполнение требований к характеристикам точности партии обрабатываемых деталей (главный критерий); обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей; реализация рациональной формы технологического пространства и, как следствие, оптимальной структуры этапов черновой, чистовой обработки и выхаживания в течение одного

прохода; обеспечение формоустойчивости ШК (необходимое условие выполнения главного критерия); требуемая производительность технологической операции.

Выбор критерия обеспечения точности обработанной партии деталей в качестве основного критерия предопределяет особую роль процесса формообразования для выполнения служебного назначения процесса обработки.

В связи с этим при создании проекта

цифрового образа ТО предлагается рассматривать взаимодействие начального и конечного звеньев цепи формообразования – инструмента (И) и заготовки (З) в, так называемом, пространстве технологического взаимодействия (ПТВ) (рис. 4). Влияние других элементов цепи формообразо-

вания – приспособлений инструментов ($\Pi_{и1}$ и $\Pi_{и2}$), приспособления заготовки (Π_3), станка (С), как базового элемента – предлагается заменить связями геометрическими C_1 , силовыми C_2 , упругими C_3 , тепловыми C_4 и др. C_i .

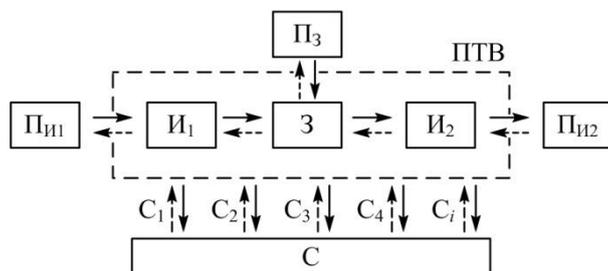


Рис. 4. Схема пространства технологического взаимодействия (ПТВ)
Fig. 4. Scheme of the space of technological interaction (STI)

Рассмотренные функциональная модель технологической операции, алгоритм проектирования ТО и схема пространства технологического взаимодействия лежат в основе комплекса моделей, необходимых для создания цифрового образа ТО.

Совокупность применяемых моделей при постановке задачи технологического формообразования как приоритетной представляет собой иерархическую структуру (рис. 5).



Рис. 5. Иерархическая структура применяемых моделей
Fig. 5. Hierarchical structure of applied models

В основе данной иерархии лежит такой показатель как степень обобщения выходных параметров. Выходные характери-

стики моделей нижнего уровня являются входными для моделей более высокого уровня. Математическим ядром модели

формообразования служит уравнение, в котором аргументами функции формообразования являются детерминанты – наиболее значимые геометрические и кинематические характеристики цепи формообразования [1]. Входными характеристиками геометрических и кинематических моделей являются доминирующие факто-

ры, которые в свою очередь являются выходными параметрами физико-механических моделей (упругие и температурные деформации, эпюры износа направляющих элементов станка, износ режущего инструмента, относительные колебания инструмента и заготовки и др.).

Структурно-функциональная и критериальные модели процесса ТО

Методологической базой для создания математических критериальных моделей процесса ТО служит его структурно-функциональная модель, в которой наглядно показаны действующие причинно-следственные связи и взаимовлияние

объектов технологической системы и их характеристик. На рис. 6 представлена структурно-функциональная модель ТО при выборе критерия обеспечения точности обработки в качестве главного.

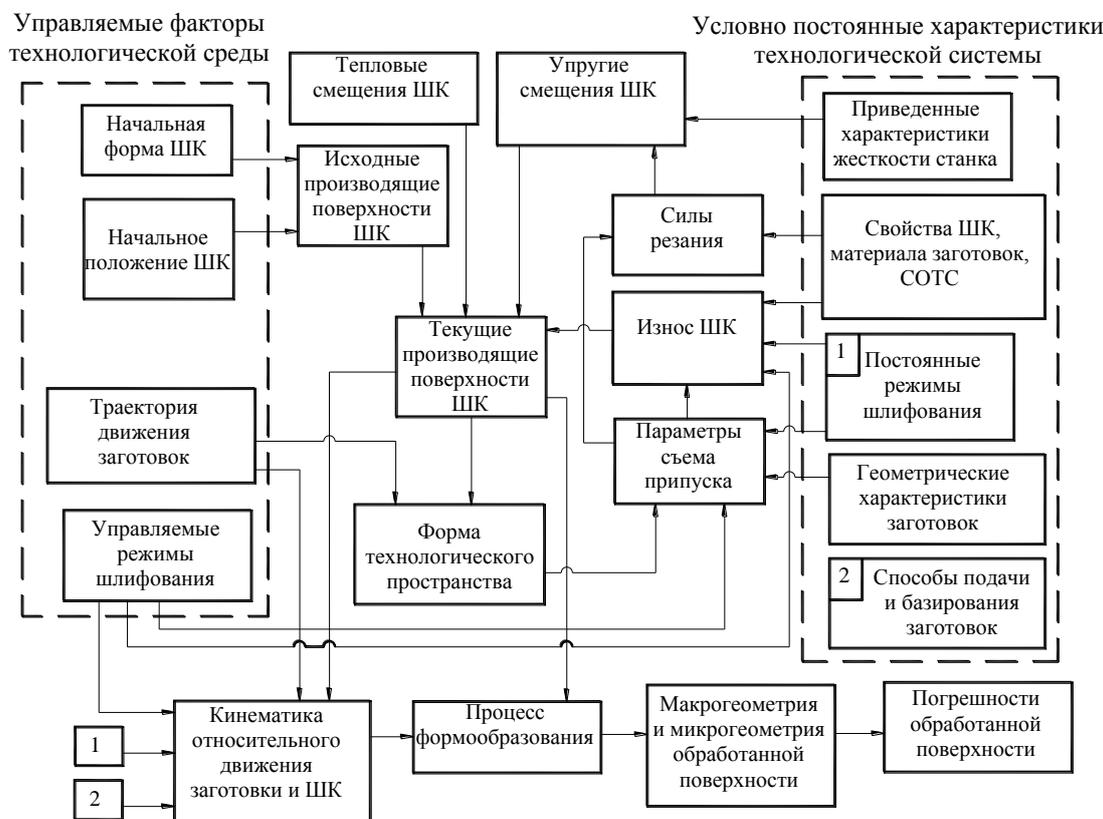


Рис. 6. Структурно-функциональная модель ТО
Fig. 6. Structural and functional model of the FG process

Процесс формообразования определяется кинематическими и геометрическими характеристиками взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки. Геометрические и кинематические характеристики можно отнести к: 1) номинальным с заданной схемой и режимами обработки; 2) к факторным, природа которых связана с физико-механическим взаимодействием. В структурно-функциональной

модели на рис. 6 к номинальным характеристикам относятся исходная форма ШК после правки, начальное положение в пространстве ШК, заданная траектория подачи деталей, режимы резания, упругие характеристики станка и др.

К факторным характеристикам относятся упругие и тепловые смещения ШК, характеристики износа ШК и трансформация его профиля, фактическая кинематика

обрабатываемой заготовки [12], определяемая как результат ее взаимодействия с рабочими поверхностями ШК.

Структурно-функциональная модель процесса ТО отражает содержание и взаимосвязи структурных элементов процесса обработки и является методической основой для создания его цифрового образа.

Анализ структурно-функциональной модели ТО показал, что для создания цифрового образа ТО, адекватно имитирующего реальный процесс, необходимо создание комплекса взаимосвязанных критериальных моделей. Была разработана модельная среда из следующих четырех основных моделей.

1) модель формирования технологического пространства с выходными характеристиками, определяющими форму рабочего пространства, его искажение в результате упругих деформаций, закономер-

ности съема припуска;

2) модель износа шлифовальных кругов с выходными характеристиками, определяющими топографию рабочих поверхностей ШК в произвольный момент времени при шлифовании потока заготовок;

3) модель правки рабочих поверхностей с выходными характеристиками, определяющими: в задаче анализа – форму шлифовальных кругов в результате правки; в задаче синтеза – требуемые углы установки правки относительно шпиндельной бабки для получения заданного профиля ШК;

4) модель формообразования торцовых поверхностей обрабатываемых деталей, с выходными характеристиками, определяющими топографию обрабатываемых поверхностей их погрешности, показатели точности.

Результаты проектирования цифровой модели процесса ТО

На рис. 7 и 8 представлены примеры результатов реализации цифровой модели процесса ТО цилиндрических роликов, разработанной на основе приведенных выше методологических положений.

На рис. 7 показана графическая интерпретация синтеза параметров настройки – угловых смещений ШК в горизонтальной γ и вертикальной α плоскостях. Область эффективных значений параметров 7 находится в границах замкнутого контура, образованного линиями, положение которых определяется в результате моделиро-

вания: 1 и 2 – кинематические ограничения из модели формообразования; 3 – обеспечение рациональной структуры съема припуска из модели формирования технологического пространства; 4 – обеспечение формоустойчивости ШК из модели трансформации технологического пространства; 5 – ограничение на выпуклость торца из модели формообразования; 6 – одно из условий стабильности формы ШК из модели трансформации технологического пространства.

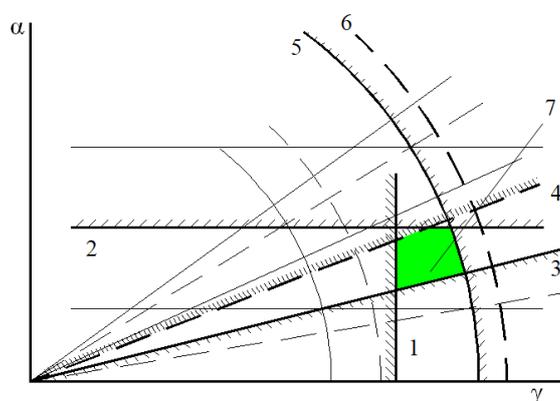


Рис. 7. Результаты реализации цифровой модели процесса ТО – синтез угловых параметров настройки ШК

Fig. 7. The results of the implementation of the digital model of the process of DG – the synthesis of the angular settings of the GW

Текущая обрабатываемая поверхность ролика с идентифицированной мгновенной поверхностью шлифования (рис. 8) в точке траектории, соответствующей фазе выхаживания цикла шлифования, формируется в результате имитационного моде-

лирования формообразования (модуль 4). При этом модели 1 – 3 являются входными моделями, позволяющими определить текущую форму и положение производящих поверхностей двух оппозитных ШК (параметры настройки γ и α).

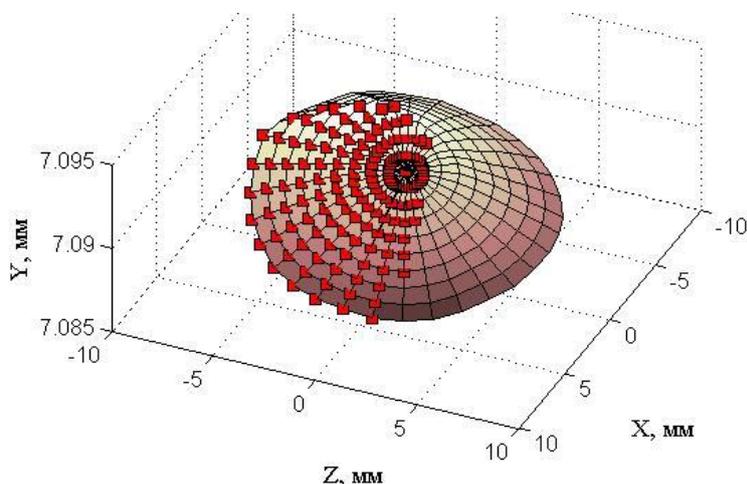


Рис. 8. Пример текущей обрабатываемой поверхности ролика с идентифицированной мгновенной поверхностью шлифования
Fig. 8. Example of the current processed roller surface with an identified instantaneous grinding surface

Заклучение

В статье предложена систематизация моделей, используемых при проектировании процесса обработки и его цифрового образа.

Представлены: алгоритм структурно-параметрического проектирования двусторонней ТО, структурно-функциональная модель процесса формообразования заготовки как вариант детализации и декомпозиции обобщенной функциональной модели процесса, объекты и связи пространства технологического взаимодействия, которые в совокупности являются методологической основой для виртуального представления ТО.

Результаты виртуальной ТО цилиндрических роликов при найденных на ос-

нове изложенных методических рекомендаций технологических параметрах настройки станка показывают, что требуемые значения доминирующих погрешностей формы и взаимного положения обрабатываемых поверхностей обеспечиваются в заданных пределах. Так торцовое биение и выпуклость торцов цилиндрического ролика не превышает 5 мкм и соответствует результатам шлифования в производственных условиях [4].

Таким образом, изложенные в статье методические положения и модельная среда могут быть использованы при разработке автоматизированной системы технологической подготовки ТО в условиях цифрового производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Portman V.T. Development of the form-shaping system theory with design applications. The 2nd KEIO University Symposium, March 28. Tokyo, 1994. Pp. 1-17.
2. Carrino L., Giorleo G., Polini W., Prisco U. Dimensional errors in longitudinal turning based on the

- unified generalized mechanics of cutting approach. International Journal of Machine-Tools and Manufacture. Part 1. Three-dimensional theory. 2002. Vol. 42: Pp. 1509-1515.
3. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических си-

стем : монография. Курск: Курск. гос. техн. ун-т. 2010. 151 с. ISBN 978-5-7681-0540-2.

4. Вайнер Л.Г. Технологическое управление процессом формообразования при двусторонней торцевшлифовальной обработке: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: дис. на соискание ученой степени докт. тех. наук / Вайнер Леонид Григорьевич; Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж, 2015. 359 с. Библиогр.: с. 337-359.
5. Альгин В.Б., Блюменштейн В.Ю., Васильев А.С. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин: под. общ. ред. П. А. Витязя. Минск : Беларус. навука, 2010. 109 с. ISBN 978-985-08-1238-4.
6. Марка Д., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. М. : Мета Технология, 1993. 240 с.
7. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общ. ред. А. Г. Суслова. М. : Машиностроение, 2006. 447 с. ISBN 5-217-03308-8.
8. Fyodorov V.P., Nagorkin M.N., Totai A.V. Determination of parametric reliability of machining

REFERENCES

1. Portman VT. Development of the form-shaping system theory with design applications. The 2nd KEIO University Symposium; 1994 March 28; Tokyo, 1994. p. 1-17.
2. Carrino L, Giorleo G, Polini W, Prisco U. Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Intern Journ of Machine-Tools and Manufacture. Part 1. Three-dimensional theory. 2002;42:1509-1515.
3. Ivakhnenko AG., Kutz VV. Structural and parametric synthesis of technological systems: monograph. Kursk: Kursk. State Technical University. 2010;151.
4. Vayner LG. Technological control of forming during two-sided face grinding [dissertation]. [Voronezh (RF)]: Voronezh State Technical University; 2015.
5. Algin VB., Blumenstein VYu, Vasilyev AS. Technological and operational methods of ensuring the quality of machines. Minsk: Belarus. Navuka; 2010.
6. Marka D, McGowan K. Methodology of structural analysis and design. Moscow: Meta Technologiya; 1993.
7. Suslov AG, Fedorov VP, Gorlenko OA. Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections. Moscow: Mashinostroenie; 2006.
8. Fyodorov VP, Nagorkin MN, Totai AV. Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016;(124):012053. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012053
9. Fedorov VP, Nagorkin MN, Vayner LG. Methodological foundations of diagnostics of metalworking technological systems according to parametric reliability of ensuring a given quality of the treated surfaces. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021;11(108): 49-63. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-36-50.
10. Weiner L. The regularities of allowance removal in grinding ends of cylindrical rollers. Materials Today: Proceedings. 2019;19(5): 2535-2539. DOI: 10.1016/J.matpr.2019.08.192.
11. Andrianova IA, Shakhnovsky SS. Improving the accuracy of two-sided face grinding by stabilizing the coolant temperature. Stanki I Instrumenti. 1984;1:23-24.
12. Vayner LG. Modeling of bilateral end-finishing kinematic characteristics. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2020;7:20-26. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-20-26.

Информация об авторах:

Вайнер Леонид Григорьевич, доцент, доктор технических наук, и. о. заведующего кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеанского гос-

ударственного университета, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» Дальневосточного государственного университета путей

сообщения (совм.), почетный работник высшего профессионального образования РФ; тел. 8-914-541-51-49, Igvainer@mail.ru, Scopus-Author ID: 7004052035, Author-ID-РИНЦ: 119940.

Нагоркин Максим Николаевич, доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского государ-

Vayner Leonid Grigoryevich, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Internal Combustion Engines at the Pacific National University, Professor of the Department of Transport and Technological Complexes at Far Eastern State Transport University, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, phone: 8-914-541-51-49, Igvainer@mail.ru, Scopus-Author ID: 7004052035, Author-ID-RSCI:

ственного технического университета, тел. 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID-РИНЦ: 391768

Максимов Максим Максимович – студент транспортно-энергетического факультета Тихоокеанского государственного университета.

119940.

Nagorkin Maksim Nikolaevich, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru; Author-ID- RSCI: 391768.

Maksimov Maksim Maksimovic, student of Transport and Energy Faculty at Pacific State University.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 05.08.2022. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was received by the editors on 15.07.2022; approved after peer review on 28.07.2022; accepted for publication on 05.08.2022. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Cutting Machines and Tools of the Bryansk State Technical University, Chief Editor of the journal *Transport Engineering*.