

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Гаращенко Ярослав Миколайович

УДК 621.7

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ПРОЦЕСІВ**  
**ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ ПРИ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ**  
**3D-МОДЕЛЕЙ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ**

05.02.08 – технологія машинобудування

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Гаращ Я.М. Гаращенко

Науковий консультант:

Доброскок Володимир Леонідович, доктор технічних наук, професор

*Голова з першим проректором  
дисертаційної комісії  
вченої секції організованої вченої докторської  
ради ДБФ 050.*

*Олена МАРТОНА*  
*30.04.2024р.*



## АНОТАЦІЯ

*Гаращенко Я.М.* Основи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при матеріалізації 3D-моделей адитивними методами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.08 «Технологія машинобудування» (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України, Харків, 2024.

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України. З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова 2.

Дисертацію присвячено розробці основ і системи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при матеріалізації 3D-моделей шляхом їх пошарової побудови та підвищення ефективності адитивних методів на базі об'єктно-орієнтованої методології статистичного аналізу геометричних даних.

У роботі запропоновано нову концепцію технологічної підготовки отримання складних виробів адитивними методами, в рамках якої вирішуються основні задачі - структурна оборотна декомпозиція, раціональна орієнтація і розміщення виробу в робочому просторі пошарової побудови та формування набору шарів на базі єдиної методології статистичного аналізу полігональної, воксельної та пошарової моделей виробу. Аналіз полігональної 3D-моделі виконується для попередньої оцінки геометричної складності з метою визначення технологічності виробу та прийняття рішення щодо стратегії виготовлення. Аналіз воксельної 3D-моделі для попередньої та поетапної оцінки просторового розподілу матеріалу виробу з метою ефективної реалізації

технологічної підготовки. Аналіз пошарової моделі для підсумкової оцінки ефективності використання адитивного методу.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси виготовлення деталей машин адитивними методами пошарової побудови.

*Предмет дослідження* – технологічна підготовка процесів виготовлення складних виробів шляхом матеріалізації 3D-моделей адитивними методами пошарової побудови на базі об'єктно-орієнтованої методології статистичного аналізу геометричних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці теоретичних основ технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами на базі єдиної методології статистичного аналізу геометричних даних 3D-моделей та пошарового формування.

Вперше.

1. Розроблено концепцію технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами на базі єдиної методології статистичного аналізу вихідної полігональної (триангульованої), похідної вексельної, та результуючої пошарової 3D-моделей виробу чи групи виробів.

2. Створено основи для оцінки технологічності конструкції виробів шляхом аналізу триангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделі за наступними складовими складності виробу: геометричної, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної, що дозволяє забезпечити науково обґрунтовану оцінку відповідності конструкторських вимог до вибраної стратегії виготовлення.

3. Запропоновано математичну модель статистичного аналізу розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення, що дозволяє науково-обґрунтовано визначати геометричну складність контурів і виконувати оцінку можливості їх одержання пошаровим формоутворенням. Фрактальна розмірність, яка є незалежною від масштабу виробу, використовується при порівняльному аналізі складності контурів.

4. Сформульовано принципи ефективного використання робочого

простору установок на основі статистичного аналізу просторового розподілу елементарних об'ємів окремих виробів та їх композицій з використанням їхніх воксельних 3D-моделей для оцінювання спільного вирішення таких трьох задач технологічної підготовки як: структурна оборотна декомпозиція, орієнтація та розміщення у робочому просторі пошарового формоутворення.

Удосконалено.

5. Попередній аналіз полігональної 3D-моделі з оцінкою геометричної складності для визначення технологічності виробу та прийняття рішення щодо стратегії виготовлення. Оцінка геометричної складності поверхні виробів виконується шляхом аналізу впливу параметрів триангуляції (допустимої похибки, максимально допустимих значень розміру ребра, а також двогранного кута між суміжними гранями) на кількість трикутних граней 3D-моделі, що замінюють поверхню в CAD-системі.

6. Моделі вирішення задач технологічної підготовки щодо раціональної орієнтації виробу у робочому просторі використовують цільову функцію мінімізації площі поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення, таким чином збільшуючи кількість варіантів орієнтації для подальшого використання у задачі розташування виробу у робочому просторі.

7. Математичну модель адаптивного розсічення (формування пошарової моделі), яка заснована на статистичному аналізі розподілу кутів між вектором напрямку побудови і нормаліями поверхонь з урахуванням відносної площі полігонів, які потрапили у шар побудови, що дозволяє обґрунтовано зменшити кількість шарів, а відповідно технологічний час виготовлення виробів при забезпеченні заданої точності формоутворення.

Дістало подальший розвиток.

8. Візуальний аналіз технологічності конструкції виробу. Розроблена математична модель колірної візуалізації площі граней 3D-моделі складного виробу на основі відображення на триангуляційну модель сфери за напрямком векторів нормалей у сферичній системі координат істотно підвищує рівень наочності при оцінці придатності конструкції до раціональної орієнтації виробу

у робочому просторі пошарового формоутворення.

У результаті проведених досліджень розроблено систему технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами. Розроблена система дозволяє виконувати задачі з визначення раціональних параметрів процесів пошарової побудови на основі аналізу вихідних та похідних 3D-моделей. Практично реалізовано вирішення задачі розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі шляхом її виконання методом Монте-Карло, генетичним алгоритмом та іншими. Можливість суміщення режимів роботи дозволяє істотно підвищити ефективність використання робочого простору адитивної установки.

Виходячи з результатів досліджень, запропоновано технічні рішення щодо виконання наступних задач: структурна оборотна декомпозиція, раціональна орієнтація, розміщення у робочому просторі, визначення стратегій розсічення і формоутворення шарів. Практичні рекомендації щодо виконання технологічної підготовки впроваджено у виробничих умовах НТУ «ХП». Результати досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХП" при підготовці фахівців з навчальної спеціальності «Прикладна механіка» та ПЗВО Харківський Технологічний Університет «Шаг» з навчальної спеціальності «Інформаційні системи та технології». Практичні рекомендації щодо виконання технологічної підготовки впроваджено у виробничих умовах НТУ «ХП», ТОВ «НВЦ Європейські технології машинобудування» і ТОВ «Геополімер».

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку в області адитивного виробництва. Визначено основні шляхи розширення можливостей адитивних методів пошарової побудови: удосконалення устаткування, збільшення різноманітності (номенклатури) використовуваних матеріалів та підвищення ефективності технологічної підготовки.

У другому розділі розглянуто питання методології досліджень, загальні умови, обладнання та матеріали, використані в експериментах. Представлено методики для аналізу триангуляційних 3D-моделей промислових виробів.

Наведено опис застосованого програмного забезпечення.

У третьому розділі розглянуто питання щодо виконання оцінки технологічності конструкції виробів, одержуваних з використанням адитивних методів. Пропонується набір показників складності виробу з урахуванням всіх складових поняття "складність": геометричної, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної. Ці показники відображають специфічні особливості адитивних методів пошарової побудови. Набір показників дозволяє науково обґрунтовано здійснювати вибір стратегії виготовлення виробу на початку технологічної підготовки.

У четвертому розділі розглянуто питання розробки методологічних основ технологічної підготовки процесів адитивного виготовлення складних виробів, реалізуючих комплексний підхід до вирішення оптимізаційних задач. Представлено необхідне інформаційне, алгоритмічне та методичне забезпечення, що створює основу для розробки комп'ютерної системи технологічної підготовки.

За результатами модельних досліджень сформульовано принципи ефективного використання робочого простору установок. Запропоновано визначати показники ефективного використання робочого простору на основі статистичного аналізу просторового розподілу елементарних об'ємів окремих виробів і їх композицій.

У п'ятому розділі викладено концепцію розробленої системи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами. Розглянуто її структуру та основні елементи. Сформульовано комплекс умов, необхідних для реалістичного виконання задач технологічної підготовки і статистичного аналізу досліджуваних ознак.

У шостому розділі представлено результати експериментальних досліджень і практичного вирішення комплексу задач в системі технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами. На основі експериментальних і модельних даних вироблено рекомендації щодо реалізації розроблених підходів до вирішення таких оптимізаційних задач, як

структурної оборотної декомпозиції, раціональної орієнтації і розміщення в робочому просторі з вибором стратегії пошарової побудови. Запропоновано практичні підходи щодо підвищення точності пошарової побудови та ефективності використання робочого простору установки.

*Ключові слова:* технологічна підготовка виробництва, інтегрована технологія, пошарова побудова виробу, точність формоутворення, продуктивність формоутворення, складність виробу, 3D-модель робочого простору.

### Список публікацій здобувача

1. Гаращенко Я. М. Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів: *монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 388 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64322>.

2. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Integral characteristics of triangulation 3D models of products. *Key Engineering Materials*. Switzerland, 2014. Vol. 581. P. 281-286. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.281.

3. Garashchenko Y., Zubkova N. Adaptive slicing in the additive manufacturing process using the statistical layered analysis. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. P. 253-263. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7\_25.

4. Garashchenko Y., Rucki M. Part decomposition efficiency expectation evaluation in additive manufacturing process planning. *International Journal of Production Research*. 2021. 14 p. DOI: 10.1080/00207543.2020.1824084.

5. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M. Comparative accuracy analysis of triangulated surface models of a fossil skull digitized with various optic devices. *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 29, No. 1. 2022. 15p. <https://metrology.wat.edu.pl/earlyaccess/29/1/MMS-01217-2021-03-Early-Access.pdf>. DOI: 10.24425/mms.2022.138547.

6. Garashchenko Y., Vitiaziev J., Grimzin I. Packing 3D-Models of Products in Build Space of Additive Manufacturing Machine by Genetic Algorithm. *Advanced*

*Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022. P. 67-77. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4\_7.

7. Rucki M., Garashchenko Y., Kogan I., Ryba T. Evaluation of the Fidelity of Additively Manufactured 3D Models of a Fossil Skull. *Advances in Manufacturing III. Manufacturing 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022. P. 36-47. DOI: 10.1007/978-3-031-03925-6\_4.

8. Garashchenko Y., Dasic P. The Efficiency of Adaptive Slicing Group of Rationally Oriented Products for Layered Manufacturing. *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2023. P. 98-108. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8\_10.

9. Garashchenko Y., Fedorovich V., Ostroverkh Y., Dašić P., Anđelković M., Onalla H. Statistical Analysis of Deviations from the Correct Shape of Surface Depending on Product Orientation in Workspace of Additive Machine. *Machines*. 2023; 11(3): 348. DOI: 10.3390/machines11030348.

10. Доброскок В., Гаращенко Я. Оценка геометрической сложности изделий на основе анализа зависимости количества граней триангуляционных моделей от допустимого двугранного угла между смежными гранями. *Българско списание за инженерно проектиране*. Издател: Машиностроителен факултет, Технически университет - София, 2017 (31). С. 63-71.

[http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031\(2017\).pdf](http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031(2017).pdf).

11. Garashchenko Y. Evaluation of geometrical complexity of products based on the analysis of triangulated models. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*. Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu. No 1. 2017. P. 184-190.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/315e37c6-6d47-4552-9ee1-b11b3b09eff3/content>.

12. Garashchenko Y. Estimation of complexity of field contours of layer building with the use of cell method of determining the fractal dimension. *Acta Mechanica Slovaca*, 22(2). 2018. P. 16-23. <https://www.actamechanica.sk/magno/ams/2018/mn2.php>. DOI: 10.21496/ams.2018.012.

13. Garashchenko Y. Evaluation of manufacturability for the effective decomposition of product when layered build. *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series*, No. 3/2017. pp. 94-99.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b96e0bcb-bf09-4f97-a0ad-605860edf1a2/content>.



14. Rucki M., Garashchenko Y., Kogan I., Ryba T. Metrological analysis of additively manufactured copies of a fossil skull. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Article number: e143827. Vol. 70(6). 2022. P. 1-10. DOI: 10.24425/bpasts.2022.143827.

15. Доброскок В.Л., Фадеев В.А., Гаращенко Я.Н., Чернышов С.И. Морфологический анализ триангуляционных моделей промышленных изделий. *Резание и инструмент в технологических системах*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. Вып. 79. С. 52-63. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez79\\_2011.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez79_2011.pdf).

16. Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Латыш Т.Ю. Верификация триангуляционных моделей после оптико-цифрового сканирования. *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.* Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. Вып. 82. С. 50-57. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/17859>.

17. Гаращенко Я.Н. Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 26 (1248). С. 44–50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32414>.

18. Гаращенко Я.Н. Оценка исходной 3D-модели на приспособленность к определению рациональной ориентации изделия при послойном построении. *Резание и инструмент в технологических системах*, 2017, Вып. 87. С. 28-40. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/31234>.

19. Гаращенко Я.М. Візуальна оцінка можливості раціональної орієнтації виробу при пошаровій побудові на установках адитивних технологій. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. Житомир: ЖДТУ, Том 1, № 2(80), 2017. С. 3-10. DOI: 10.26642/tn-2017-2(80)-3-10.

20. Гаращенко Я.Н. Оценка сложности контуров областей послойного формообразования на основе анализа фрактальной размерности. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Сер.: Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ "ХПІ", 2018. № 6 (1282). С. 24-30. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018\\_6.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_6.pdf).

21. Гаращенко Я.М. Адаптивне пошарове розділення 3D моделі виробу в адитивних технологіях. *Вісник ЖДТУ*. 2018. № 1 (81). С. 17-24. DOI: 10.26642/tn-2018-1(81)-17-24.

22. Витязев Ю.Б., Гаращенко Я.Н. Рациональная ориентация изделия при его послойном формообразовании на основе статистического анализа исходной триангуляционной 3D модели. *Резание и инструменты в технологических*

системах. Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. Вып. 88. С. 18-31.  
[http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez\\_88\\_2018.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez_88_2018.pdf).

23. Гаращенко Я.Н. Оценка прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия при его послойном изготовлении. *Резание и инструменты в технологических системах*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. Вып. 89. С. 18-32. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/40302>.

24. Гаращенко Я.М., Зубкова Н.В. Раціональне розташування за методом Монте-Карло 3D-моделей виробів у робочому просторі установки пошарової побудови. *Вісник ЖДТУ. Прикладна механіка*. № 1 (85). 2020. С. 46-52. DOI: 10.26642/ten-2020-1(85)-46-52.

25. Garashchenko Y., Zubkova N. Evaluation of the forecasted efficiency of performance of rational orientation of the product in the workspace of additive installations. *Cutting & Tools in Technological System*, No. 94. 2021. P. 142-150. DOI: 10.20998/2078-7405.2021.94.16.

26. Garashchenko Y. Evaluation of performance efficiency of packing a group of products in the workplace of additive machine using a genetic algorithm. *Cutting and Tools in Technological Systems*. № 96. 2022. P. 14-21. DOI: 10.20998/2078-7405.2022.96.02.

27. Garashchenko Y., Harashchenko O. Influence of determination accuracy of the build step on the efficiency of adaptive slicing group of products for layered manufacturing. *Cutting and Tools in Technological Systems*. № 97. 2022. P. 164-172. DOI: 10.20998/2078-7405.2022.97.15.

28. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Гаращенко Я.Н. Особенности описания 3D образов изделий STL-файлами. *Високі технології в машинобудуванні*: Зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ". 2006. Вип. 1(12). С. 159-164.

29. Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Чернышов С.И., Зубкова Н.В. Возможности современных САД систем при переходе к триангулированным моделям. *Високі технології в машинобудуванні*: Зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ". 2010. Вип. 1(20). С. 79-86.

30. Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Гаращенко Я.Н., Сидорчук Д.П. Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric Iscan. *Сучасні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць. Вип. 4. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. С. 123-135.

31. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Гаращенко Я.Н. Современное оборудование и программное обеспечение обратного

инжиниринга промышленных изделий. *Сучасні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць. Вип. 5. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. С. 138-152.

32. Гаращенко Я.Н. Анализ характеристик послойного построения в зависимости от ориентации изделия в рабочем пространстве установки. *Сучасні технології в машинобудуванні*. Вип. 13. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 79-91.

33. Гаращенко Я.Н. Возможности визуального и статистического анализа для оценки применимости декомпозиции изделия при его послойном изготовлении. *Високі технології в машинобудуванні*. Харків, НТУ "ХПІ", Вип. 1 (28). 2018. С. 44-53.

34. Пат. UA 117759 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів з використанням лазерного джерела тепла на базі триангуляційної 3D моделі. № u201700060 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 5 с.

35. Пат. UA 117760 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі структурної декомпозиції вихідної триангуляційної 3D моделі. № u201700062 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 6 с.

36. Пат. UA 117764 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, G06F 17/50 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів зі змінною товщиною шарів на базі триангуляційної 3D моделі. № u201700070 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 7 с.

37. Пат. UA 117768 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 19/00, H01J 37/30 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі триангуляційної 3D моделі за заданою стратегією обробки лазерним промінням. № u201700075 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 3 с.

38. Пат. UA 117776 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, G06F 17/50, G06F 19/00 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі триангуляційної 3D моделі. № u201700135 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 6 с.

39. Пат. UA 117777 U УКРАЇНА, МПК G06F 17/50, G06F 19/00, В29С 35/08, H01J 37/30 / В.Л. Доброскок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі триангуляційної 3D моделі за

багатопрохідною стратегією обробки лазерним промінням. № u201700138 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. 3 с.

40. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. Materialization accuracy of products by generative technologies of macrolevel. XXIV MicroCAD 2010 International Scientific Conference. 18-20 March 2010. Section N: Production Engineering and Manufacturing Systems. pp. 57-62.

41. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. Reverse engineering of products by using an optical-digital machine Imetric Iscan. XXV MicroCAD 2011 International Scientific Conference. Section L: Production Engineering and Manufacturing Systems. 31 March – 1 April 2011. pp. 59-64.

42. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. The morphological analysis of 3D models of industrial products. *The Publications of the XXVI. microCAD International Scientific Conference*. 29-30 March 2012 [Електрон. ресурс: електрон. текст. і граф. дані. 1 електрон. оптич. диск (CD-ROM); Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2012.

43. Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Quality criteria of the triangulation 3D models of industrial products. *Proceedings of the 13th International Conference on Tools (ICT 2012)*. 27-28 March 2012, Miskolc [Угорщина]. Miskolc: University of Miskolc, 2012. PP. 209-214.

44. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Definition of the statistical characteristics of the triangulated models at forecasting of the products shaping time. *The Publications of the XXVII. microCAD International Scientific Conference University of Miskolc*, 21-22 March, 2013 [Електрон. ресурс: електрон. текст. і граф. дані. – 1 електрон. оптич. диск (CD-ROM); ISBN 978-963-358-018-9]. Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2013. 6 p.

45. Dobroskok V.L., Pogarsky A.V., Garashchenko Y.N. Improving the accuracy of products in their building by selective laser sintering using compensating deformations of initial triangulated models. *The Publications of the Multi Science - XXX. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc*, 21-22 April, 2016. Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2016. 6 p.

46. Доброскок В.Л., Гаращенко Я.М., Геймор Д.М. Рішення задач раціонального розміщення виробів у робочому просторі SLS установки. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2016*, 16-18 травня 2016 р. Харків: НТУ «ХП». С. 111.

47. Гаращенко Я.М. Комплексне рішення оптимізаційних задач технологічної підготовки виготовлення виробів адитивними технологіями. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018*, 16-18 травня 2018 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 81.

48. Гаращенко Я.М. Визначення раціонального розташування 3D-моделей виробів у робочому просторі при їх пошаровій побудові. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, 15-17 травня 2019 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 91.

49. Гаращенко Я.М. Розташування 3D-моделей виробів у робочому просторі при їх пошаровій побудові за методом Монте-Карло. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020*, 28-30 жовтня 2020 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 110.

50. Гаращенко Я.М. Формування 3D-моделі робочого простору установки адитивних технологій за генетичним алгоритмом. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021*, 18-20 травня 2021 р. Харків: НТУ «ХПІ». Ч. I. С. 84.

51. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M. Analysis of 3D triangulated models of *Madygenperpeton pustulatum* fossil skull. *Virtual Conference. Conference Proceedings 21st International Conference & Exhibition*, 7-11 June 2021, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, P. 89-90.

52. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M., Gevorkian E. Assessment of 3D digital models of *Madygenperpeton pustulatum* holotype. *International Conference on New Research and Development in Technical and Natural Science*, 20 December 2022, Faculty of Information Studies in Novo mesto, Complex System Company s.p., P. 6-7.

53. Гаращенко Я.М., Гаращенко О.С. Оцінка ефективності розміщення виробів у робочому просторі адитивної установки на основі фрактального аналізу. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*, 18-20 травня 2023 р. Харків: НТУ «ХПІ». Ч. I. С. 161.

## ANNOTATION

*Garashchenko Ya.M.* Fundamentals of technological preparation of complex products manufacturing processes in the materialization of 3D models by additive methods. – Qualification of scientific work with the manuscript copyright.

Thesis for Doctor of Technical Sciences on specialty 05.02.08 – Manufacturing engineering (13 – Mechanical engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The work was performed at the department of integrated engineering technologies named after M.F. Semka of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine. The dissertation can be consulted in the library of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" at the address: 61002, Kharkiv, str. Kirpychova 2.

The dissertation is devoted to the development of the foundations and system of technological preparation of the manufacturing processes of complex products during the materialization of 3D models through their layered building and increasing the efficiency of additive methods based on the object-oriented methodology of statistical analysis of geometric data.

The work proposes a new concept of technological preparation for obtaining complex products by additive methods, within which the main tasks are solved - structural reversible decomposition, rational orientation, and placement of the product in the workspace and formation of a set of layers based on a unified methodology of statistical analysis of polygonal, voxel and layered models' product. The analysis of the polygonal 3D model is performed for the preliminary assessment of the geometric complexity to determine the manufacturability of the product and to make a decision on the manufacturing strategy. Analysis of the voxel 3D model for the preliminary and step-by-step assessment of the spatial distribution of the material of the product to effectively implement technological preparation. Analysis of the layered model for the final evaluation of the effectiveness of the use of the additive method.

*The object of research* is the technological processes of manufacturing machine parts using additive methods of layered building.

*The subject of research* is the technological preparation of the manufacturing processes of complex products through the materialization of 3D models by additive methods of layered building based on the object-oriented methodology of statistical analysis of geometric data.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of the theoretical foundations of the technological preparation of the manufacturing processes of complex products by additive methods based on a unified methodology of statistical analysis of geometric data of their 3D models and layered building.

For the first time:

- the concept of technological preparation of the manufacturing processes of complex products by additive methods was developed on the basis of a unified methodology of statistical analysis of the initial polygonal (triangulation), derived voxel and resulting layered 3D models of the product or group of products;

- the basis for assessing the manufacturability of the design of products obtained by additive methods by analyzing the triangulation, voxel and layer-by-layer 3D model according to the following components of the complexity of the product, which reflect the features of layered manufacturing: geometric, material structure, hierarchical and functional, was created, which allows for a scientifically based assessment compliance with the design requirements for the selected manufacturing strategy;

- a mathematical model of the statistical analysis of the distribution of the fractal dimension of the contours of the areas of layered molding is proposed, which allows scientifically based determination of the geometric complexity of the contours and the evaluation of the possibility of obtaining them by additive methods of layered construction (the fractal dimension, which is independent of the scale of the product, is used in the comparative analysis of the complexity of the contours );

- the principles of effective use of the workspace of installations are formulated on the basis of a statistical analysis of the spatial distribution of the elementary

volumes of individual products and their compositions using their voxel 3D models, which allows to evaluate the joint solution of such tasks as: structural reversible decomposition, orientation and placement in the workspace.

Improved:

- preliminary analysis of the polygonal 3D model, which is performed to assess the geometric complexity in order to determine the manufacturability of the product and make a decision on the manufacturing strategy; the proposed analysis of the influence of the triangulation parameters (allowable error, maximum allowable values of the edge size, as well as the dihedral angle between adjacent faces) on the number of triangular faces of the 3D model, which replace the surface in the CAD system, allows you to estimate the geometric complexity of the surface of the products regardless of their absolute dimensions ;

- models for solving the problems of technological preparation regarding the rational orientation of the product in the workspace by using the objective function of minimizing the surface area with the largest error of forming, which allows to increase the number of orientation options for further use in the task of positioning the product in the workspace;

- a mathematical model of adaptive dissection (formation of a layered model), which is based on a statistical analysis of the distribution of angles between the construction direction vector and surface normals, taking into account the relative area of polygons that have entered the construction layer, which allows you to reasonably reduce the number of layers and, accordingly, the building time of products at ensuring the given forming accuracy.

Gets further development:

- visual manufacturability analysis of the product design, the developed mathematical model of the color visualization of the area of the faces of the 3D model of the complex product based on the reflection on the triangulated model of the sphere in the direction of the normal vectors in the spherical coordinate system allows to significantly increase the level of visibility when assessing the suitability of the design for the rational orientation of the product in the workspace.



As a result of the conducted research, a system of technological preparation of the manufacturing processes of complex products by additive methods was developed. The developed system allows you to perform the tasks of determining the rational parameters of layered building processes based on the analysis of the original and derived 3D models. Placing 3D models of products in the workspace is practically implemented by Monte Carlo method, the genetic algorithm, and others. The possibility of combining work modes allows you to significantly increase the efficiency of using the workspace of the additive installation.

Technical solutions for the implementation of the following tasks are proposed based on the results of the research: structural reversible decomposition, rational orientation, placement in the workspace, determination of dissection strategies and formation of layers. Practical recommendations for the implementing of technological training have been implemented in the production conditions of NTU "KhPI". The results of the research are used in the educational process of the department "Integrated engineering technologies" of NTU "KhPI" in the training of specialists in the educational specialty "Applied mechanics" and PZVO Kharkiv Technological University "Shag" in the educational specialty "Information systems and technologies". The practical results of the research are used in the industrial conditions of LLC "NRC European Machine-Building Technologies".

The first chapter focuses on the current state and development trends of additive manufacturing. The chapter identifies several ways to expand the capabilities of additive methods, including equipment improvement, increasing the variety of materials used, and improving the efficiency of technological preparation.

The second chapter presents the research methodology and describes the general conditions, equipment, and materials used in the experiments. It also presents the methods used for the analysis of triangulated 3D models of industrial products and describes the software used in the research.

In the third chapter focuses on assessing the manufacturability of the obtained product design by additive methods, and proposes a set of complexity indicators that take into account various aspects of the product design, such as geometric

complexity, material structure, hierarchical complexity, and functional complexity. These indicators are specifically designed for additive methods of layered building, and are intended to help make informed decisions about the manufacturing strategy at the outset of technological preparation.

The fourth chapter deals with the development of the methodological foundations of the technological preparation of the processes of additive manufacturing of complex products, implementing a comprehensive approach to solving optimization problems. The necessary informational, algorithmic, and methodological support is presented, which creates a basis for the development of a computer system of technological preparation.

Based on the results of model studies, the principles of effective use of the working space were formulated. It is proposed to determine the indicators of effective use of the workspace based on the statistical analysis of the spatial distribution of the elementary volumes of individual products and their compositions. Dividing the workspace into subspaces and determining their relative filling with the material of the products made it possible to evaluate the effectiveness of such tasks as structural reversible decomposition, orientation, and packing.

The fifth chapter describes the concept of the developed system of technological preparation of the manufacturing processes of complex products by additive methods. Its structure and main elements are considered. A set of conditions necessary for the realistic implementation of technological preparation and statistical analysis of the studied features is formulated.

The sixth chapter presents the results of experimental research and the practical solution to a set of problems in the system of technological preparation of the processes of complex product manufacturing by additive methods. Based on experimental and model data, recommendations were developed for the implementation of the developed approaches to solving such optimization problems as structural reversible decomposition, rational orientation and placement in the workspace with the choice of a layered building strategy. Practical approaches to increase the accuracy of layered building and the efficiency of using the workspace of

the installation are proposed.

*Keywords:* technological preparation of production, integrated technology, layered building of product, shaping accuracy, shaping productivity, product complexity, 3D model of a workspace.

### **List of publisher publications**

1. Harashchenko Ya. M. Udoskonalennia tekhnolohichnoi pidhotovky adytyvnoho vyrobnytstva skladnykh vyrobiv [Improvement of technological preparation of additive manufacturing of complex products]: *monohrafiia*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. 388 s. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64322>.

2. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Integral characteristics of triangulation 3D models of products. *Key Engineering Materials*. Switzerland, 2014. Vol. 581. P. 281-286. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.281.

3. Garashchenko Y., Zubkova N. Adaptive slicing in the additive manufacturing process using the statistical layered analysis. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. P. 253-263. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7\_25.

4. Garashchenko Y., Rucki M. Part decomposition efficiency expectation evaluation in additive manufacturing process planning. *International Journal of Production Research*. 2021. 14 p. DOI: 10.1080/00207543.2020.1824084.

5. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M. Comparative accuracy analysis of triangulated surface models of a fossil skull digitized with various optic devices. *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 29, No. 1. 2022. 15p. <https://metrology.wat.edu.pl/earlyaccess/29/1/MMS-01217-2021-03-Early-Access.pdf>. DOI: 10.24425/mms.2022.138547.

6. Garashchenko Y., Vitiaziev J., Grimzin I. Packing 3D-Models of Products in Build Space of Additive Manufacturing Machine by Genetic Algorithm. *Advanced*

*Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022. P. 67-77. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4\_7.

7. Rucki M., Garashchenko Y., Kogan I., Ryba T. Evaluation of the Fidelity of Additively Manufactured 3D Models of a Fossil Skull. *Advances in Manufacturing III. Manufacturing 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2022. P. 36-47. DOI: 10.1007/978-3-031-03925-6\_4.

8. Garashchenko Y., Dasic P. The Efficiency of Adaptive Slicing Group of Rationally Oriented Products for Layered Manufacturing. *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2023. P. 98-108. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8\_10.

9. Garashchenko Y., Fedorovich V., Ostroverkh Y., Dašić P., Anđelković M., Onalla H. Statistical Analysis of Deviations from the Correct Shape of Surface Depending on Product Orientation in Workspace of Additive Machine. *Machines*. 2023; 11(3): 348. DOI: 10.3390/machines11030348.

10. Dobroskok V., Harashchenko Ya. Otsenka heometrycheskoi slozhnosti yzdelyi na osnove analiza zavysymosti kolychestva hranei tryanhuliatsyonnikh modelei ot dopustymoho dvuhrannoho uhla mezhdu smezhnimy hraniamy [Assessment of the geometric complexity of products based on the analysis of the dependence of the number of faces of triangulation models on the permissible dihedral angle between adjacent faces]. *Вълхарско спысанье за ynzhenerno proektyrane*. Yzdatel: Mashynostroytelen fakultet, Tekhnichesky unyversytet - Sofyia, 2017 (31). S. 63-71. [http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031\(2017\).pdf](http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031(2017).pdf).

11. Garashchenko Y. Evaluation of geometrical complexity of products based on the analysis of triangulated models. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*. Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu. No 1. 2017. P. 184-190. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/315e37c6-6d47-4552-9ee1-b11b3b09eff3/content>.

12. Garashchenko Y. Estimation of complexity of field contours of layer building with the use of cell method of determining the fractal dimension. *Acta Mechanica Slovaca*, 22(2). 2018. P. 16-23.

<https://www.actamechanica.sk/magno/ams/2018/mn2.php>. DOI: 10.21496/ams.2018.012.

13. Garashchenko Y. Evaluation of manufacturability for the effective decomposition of product when layered build. *Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series*, No. 3/2017. pp. 94-99.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b96e0bcb-bf09-4f97-a0ad-605860edf1a2/content>.

14. Rucki M., Garashchenko Y., Kogan I., Ryba T. Metrological analysis of additively manufactured copies of a fossil skull. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Article number: e143827. Vol. 70(6). 2022. P. 1-10. DOI: 10.24425/bpasts.2022.143827.

15. Dobroskok V.L., Fadeev V.A., Harashchenko Ya.N., Chernishov S.Y. Morfolohycheskyi analiz tryanhuliatsyonnikh modelei promishlennikh yzdelyi [Morphological analysis of triangulation models of industrial products]. *Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh [Cutting and tools in technological systems]*. Kharkov: NTU «KhPI». 2011. Vip. 79. S. 52-63. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez79\\_2011.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez79_2011.pdf).

16. Dobroskok V.L., Harashchenko Ya.N., Latish T.Iu. Veryfykatsyia tryanhuliatsyonnikh modelei posle optyko-tsyfrovoho skanyrovanyia [Verification of triangulation models after optical-digital scanning]. *Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh [Cutting and tools in technological systems]: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.* Kharkov: NTU "KhPI", 2012. Vip. 82. S. 50-57. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/17859>.

17. Harashchenko Ya.N. Otsenka tekhnolohychnosty konstruktsyy yzdelyi, poluchaemikh s pomoshchiu addytyvnykh tekhnolohyi [Assessment of the manufacturability of the design of products produced using additive technologies]. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering]*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. № 26 (1248). S. 44–50. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32414>.

18. Harashchenko Ya.N. Otsenka yskhodnoi 3D-modely na prysposoblennost k

opredeleniyu ratsyonalnoi oryentatsyy yzdelyia pry posloinom postroenyi [Evaluation of the original 3D model for its suitability for determining the rational orientation of the product during layer-by-layer building]. *Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh* [Cutting and tools in technological systems], 2017, Vip. 87. S. 28-40. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/31234>.

19. Harashchenko Ya.M. Vizualna otsinka mozhlyvosti ratsionalnoi oriyentatsii vyrobu pry posharovii pobudovi na ustanovkakh adytyvnykh tekhnolohii [Visual evaluation of the possibility of rational orientation of the product during layer-by-layer construction on the installations of additive technologies]. *Visnyk ZhDTU. Seriya: Tekhnichni nauky* [Bulletin of ZHTU. Series: Technical sciences]. Zhytomyr: ZhDTU, Tom 1, № 2(80), 2017. S. 3-10. DOI: 10.26642/tn-2017-2(80)-3-10.

20. Harashchenko Ya.N. Otsenka clozhnomy konturov oblastei posloinoho formoobrazovanyia na osnove analiza fraktalnoi razmernomy [Assessment of the complexity of the contours of the regions of layer-by-layer formation based on fractal dimension analysis]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Ser.: Tekhnolohii v mashynobuduvanni* [Bulletin of the National Technical University KhPI. Ser.: Technologies in mechanical engineering]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. № 6 (1282). S. 24-30. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018\\_6.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_6.pdf).

21. Harashchenko Ya.M. Adytyvne posharove rozdilennia 3D modeli vyrobu v adytyvnykh tekhnolohiiakh [Adaptive layered slicing of the 3D model of the product in additive technologies]. *Visnyk ZhDTU* [Bulletin of ZHTU]. 2018. № 1 (81). S. 17-24. DOI: 10.26642/tn-2018-1(81)-17-24.

22. Vytiazev Yu.B., Harashchenko Ya.N. Ratsyonalnaia oryentatsyia yzdelyia pry eho posloinomy formoobrazovanny na osnove statystycheskoho analiza yskhodnoi tryanhuliatsyonnoi 3D modeli [Rational orientation of the product during its layer-by-layer shaping based on statistical analysis of the original triangulation 3D model]. *Rezanye y ynstrumenti v tekhnolohycheskykh systemakh* [Cutting and tools in technological systems]. Kharkov: NTU «KhPI», 2018. Vip. 88. S. 18-31. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez\\_88\\_2018.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/rez_88_2018.pdf).

23. Harashchenko Ya.N. Otsenka prohnozyruemoi efektyvnomy

dekompozytsyy yzdelyia pry eho posloinom yzghotovlenyy [Assessment of the predicted efficiency of product decomposition during its layer-by-layer manufacturing]. *Rezanye y ynstrumenti v tekhnolohycheskykh systemakh* [Cutting and tools in technological systems]. Kharkov: NTU «KhPI», 2018. Vip. 89. S. 18-32. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/40302>.

24. Harashchenko Ya.M., Zubkova N.V. Ratsionalne roztashuvannia za metodom Monte-Karlo 3D-modelei vyrobiv u robochomu prostori ustanovky posharovoi pobudovy [Rational arrangement of 3D models of products in the working space of the layer-by-layer installation using the Monte Carlo method]. *Visnyk ZhDTU. Prykladna mekhanika* [Bulletin of ZHTU. Applied mechanics]. № 1 (85). 2020. S. 46-52. DOI: 10.26642/ten-2020-1(85)-46-52.

25. Garashchenko Y., Zubkova N. Evaluation of the forecasted efficiency of performance of rational orientation of the product in the workspace of additive installations. *Cutting & Tools in Technological System*, No. 94. 2021. P. 142-150. DOI: 10.20998/2078-7405.2021.94.16.

26. Garashchenko Y. Evaluation of performance efficiency of packing a group of products in the workplace of additive machine using a genetic algorithm. *Cutting and Tools in Technological Systems*. № 96. 2022. P. 14-21. DOI: 10.20998/2078-7405.2022.96.02.

27. Garashchenko Y., Harashchenko O. Influence of determination accuracy of the build step on the efficiency of adaptive slicing group of products for layered manufacturing. *Cutting and Tools in Technological Systems*. № 97. 2022. P. 164-172. DOI: 10.20998/2078-7405.2022.97.15.

28. Dobroskok V.L., Abduraimov L.N., Harashchenko Ya.N. Osobennosti opysanyia 3D obrazov yzdelyi STL-failamy [Features of the description of 3D images of products with STL files]. *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni* [High technologies in mechanical engineering]: Zb. nauk. pr. Kharkiv: NTU "KhPI". 2006. Vyp. 1(12). S. 159-164.

29. Dobroskok V.L., Harashchenko Ya.N., Chernishov S.Y., Zubkova N.V. Vozmozhnosity sovremennikh CAD system pry perekhode k tryanhulyrovannim

modeliam [Capabilities of modern CAD systems in the transition to triangulated models]. *Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni: Zb. nauk. pr. [High technologies in mechanical engineering]*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2010. Vyp. 1(20). S. 79-86.

30. Dobroskok V.L., Chernishov S.Y., Harashchenko Ya.N., Sydorhuk D.P. Obratnii ynzhyrynh promishlennikh yzdelyi s yspolzovanyem optyko-tsyfrovoy ustanovky ob'ємnoho skanyrovanyia Imetric Iscan [Reverse engineering of industrial products using optical-digital volumetric scanning installation Imetric Iscan]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats [Current technologies in mechanical engineering]*. Vyp. 4. Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. S. 123-135.

31. Hrabchenko A.Y., Dobroskok V.L., Chernishov S.Y., Harashchenko Ya.N. Sovremennoe oborudovanye y prohrammnoe obespechenye obratnoho ynzhyrynha promishlennikh yzdelyi [Modern equipment and software for reverse engineering of industrial products]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats [Current technologies in mechanical engineering]*. Vyp. 5. Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. S. 138-152.

32. Harashchenko Ya.N. Analiz kharakterystyk posloinoho postroenyia v zavysymosti ot oryentatsyy yzdelyia v rabochem prostranstve ustanovky [Analysis of the characteristics of layer-by-layer construction depending on the orientation of the product in the working space of the installation]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni [Current technologies in mechanical engineering]*. Vyp. 13. Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. C. 79-91.

33. Harashchenko Ya.N. Vozmozhnosity vyzualnoho y statystycheskoho analiza dlia otsenky pryemymosty dekompozytsyy yzdelyia pry eho posloinom yzghotovlenyy [Possibilities of visual and statistical analysis to assess the applicability of product decomposition during its layer-by-layer manufacturing]. *Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni [High technologies in mechanical engineering]*. Kharkiv, NTU "KhPI", Vyp. 1 (28). 2018. C. 44-53.

34. Pat. UA 117759 U UKRAINA, MPK B29S 35/08, B29S 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI".



Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv z vykorystanniam lazernoho dzherela tepla na bazi trianhuliatsiinoi 3D modeli [The method of layered building of products using a laser heat source based on a triangulated 3D model]. № u201700060 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 5 s.

35. Pat. UA 117760 U UKRAINA, MPK B29S 35/08, B29S 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI". Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv na bazi strukturnoi dekompozytsii vykhidnoi trianhuliatsiinoi 3D modeli [The method of layered building of products based on the structural decomposition of the original triangulated 3D model]. № u201700062 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 6 s.

36. Pat. UA 117764 U UKRAINA, MPK B29S 35/08, G06F 17/50 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI". Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv zi zminnoiu tovshchynoiu shariv na bazi trianhuliatsiinoi 3D modeli [The method of layered building of products with variable thickness of layers based on the triangulated 3D model]. № u201700070 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 7 s.

37. Pat. UA 117768 U UKRAINA, MPK B29S 35/08, B29S 41/02, G06F 19/00, H01J 37/30 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI". Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv na bazi trianhuliatsiinoi 3D modeli za zadanoiu stratehiieiu obrobky lazernym prominniam [The method of layered building of products based on a triangulation 3D model according to a given strategy of laser beam processing]. № u201700075 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 3 s.

38. Pat. UA 117776 U UKRAINA, MPK B29S 35/08, G06F 17/50, G06F 19/00 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI". Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv na bazi trianhuliatsiinoi 3D modeli [The method of layered building of products based on the triangulation 3D model]. № u201700135 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 6 s.

39. Pat. UA 117777 U UKRAINA, MPK G06F 17/50, G06F 19/00, B29C 35/08, H01J 37/30 / V.L. Dobroskok, Ya.M Harashchenko (UA); NTU "KhPI".

Sposib posharovoi pobudovy vyrobiv na bazi trianhuliatsiinoi 3D modeli za bahatoprokhidnoiu stratehiieiu obrobky lazernym prominniam [The method of layered building of products based on the triangulation 3D model according to the multi-pass laser processing strategy]. № u201700138 Zaiav. 03.01.2017; Opubl. 10.07.2017, Biul. № 13. 3 s.

40. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. Materialization accuracy of products by generative technologies of macrolevel. XXIV MicroCAD 2010 International Scientific Conference. 18-20 March 2010. Section N: Production Engineering and Manufacturing Systems. pp. 57-62.

41. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. Reverse engineering of products by using an optical-digital machine Imetric Iscan. XXV MicroCAD 2011 International Scientific Conference. Section L: Production Engineering and Manufacturing Systems. 31 March – 1 April 2011. pp. 59-64.

42. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Tchernyshov S.I., Garashchenko Y.N. The morphological analysis of 3D models of industrial products. *The Publications of the XXVI. microCAD International Scientific Conference*. 29-30 March 2012 [Електрон. ресурс: електрон. текст. і граф. дані. 1 електрон. оптич. диск (CD-ROM); Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2012.

43. Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Quality criteria of the triangulation 3D models of industrial products. *Proceedings of the 13th International Conference on Tools (ICT 2012)*. 27-28 March 2012, Miskolc [Угорщина]. Miskolc: University of Miskolc, 2012. PP. 209-214.

44. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Garashchenko Y.N., Abdurajimov L.N. Definition of the statistical characteristics of the triangulated models at forecasting of the products shaping time. *The Publications of the XXVII. microCAD International Scientific Conference University of Miskolc*, 21-22 March, 2013 [Електрон. ресурс: електрон. текст. і граф. дані. – 1 електрон. оптич. диск (CD-ROM); ISBN 978-963-358-018-9]. Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2013. 6 p.

45. Dobroskok V.L., Pogarsky A.V., Garashchenko Y.N. Improving the accuracy of products in their building by selective laser sintering using compensating

deformations of initial triangulated models. *The Publications of the Multi Science - XXX. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc*, 21-22 April, 2016. Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2016. 6 p.

46. Dobroskok V.L., Harashchenko Ya.M., Heimor D.M. Rishennia zadach ratsionalnoho rozmishchennia vyrobiv u robochomu prostori SLS ustanovky [Solutions to the problems of rational placement of products in the working space of the SLS installation]. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2016* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXIV international scientific and practical conference MicroCAD-2016], 16-18 travnia 2016 r. Kharkiv: NTU «KhPI». S. 111.

47. Harashchenko Ya.M. Kompleksne rishennia optymizatsiinykh zadach tekhnolohichnoi pidhotovky vyhotovlennia vyrobiv adytyvnymy tekhnolohiiamy [A comprehensive solution to the optimization problems of technological preparation for manufacturing products using additive technologies]. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2018* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXVI international scientific and practical conference MicroCAD-2018], 16-18 travnia 2018 r. Kharkiv: NTU «KhPI». S. 81.

48. Harashchenko Ya.M. Vyznachennia ratsionalnoho roztashuvannia 3D-modelei vyrobiv u robochomu prostori pry yikh posharovii pobudovi [Determining the rational location of 3D models of products in the workspace during their layered building]. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2019* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXVII international scientific and practical conference MicroCAD-2019], 15-17 travnia 2019 r. Kharkiv: NTU «KhPI». S. 91.

49. Harashchenko Ya.M. Roztashuvannia 3D-modelei vyrobiv u robochomu

prostori pry yikh posharovii pobudovi za metodom Monte-Karlo [Location of 3D models of products in the workspace during their layer-by-layer construction using the Monte Carlo method]. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2020 [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXVIII international scientific and practical conference MicroCAD-2020], 28-30 zhovtnia 2020 r. Kharkiv: NTU «KhPI». S. 110.

50. Harashchenko Ya.M. Formuvannia 3D-modeli robochoho prostoru ustanovky adytyvnykh tekhnolohii za henetychnym alhorytmom [Formation of a 3D model of the working space of the installation of additive technologies according to the genetic algorithm]. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXIX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2021 [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXIX international scientific and practical conference MicroCAD-2021], 18-20 travnia 2021 r. Kharkiv: NTU «KhPI». Ch. I. S. 84.

51. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M. Analysis of 3D triangulated models of Madygenerpeton pustulatum fossil skull. *Virtual Conference. Conference Proceedings 21st International Conference & Exhibition, 7-11 June 2021*, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, P. 89-90.

52. Garashchenko Y., Kogan I., Rucki M., Gevorkian E. Assessment of 3D digital models of Madygenerpeton pustulatum holotype. *International Conference on New Research and Development in Technical and Natural Science*, 20 December 2022, Faculty of Information Studies in Novo mesto, Complex System Company s.p., P. 6-7.

53. Harashchenko Ya.M., Harashchenko O.S. Otsinka efektyvnosti rozmishchennia vyrobiv u robochomu prostori addytyvnoi ustanovky na osnovi fraktalnoho analizu [Evaluation of the efficiency of product placement in the workspace of the additive installation based on fractal analysis]. Informatsiini

tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXIX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2023 [Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXIX international scientific and practical conference MicroCAD-2023], 18-20 travnia 2023 r. Kharkiv: NTU «KhPI». Ch. I. S. 161.