

СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Повышение коррозионной стойкости изделий из нержавеющей стали путем осаждения на их поверхности модифицирующих покрытий, включающих материалы с положительным и отрицательным электродным потенциалом, при рационально подобранных параметрах процесса осаждения П.Ю. Потапов, А.А. Верещака, В.В. Жилинский	8
Исследование адаптивных свойств модифицированного ПЭО покрытия на поверхности алюминиевого сплава Д16 В.А. Гапонов, С.Н. Григорьев, Т.Л. Мухачева, И.В. Тамбовский, С.А. Кусманов	25
Математическое моделирование и оптимизация режимов анодной плазменно-электролитной цементации технически чистого титана ВТ1-0 В.А. Гапонов, Т.Л. Мухачева, И.В. Тамбовский, И.А. Кусманова, В.М. Феклистова	37
Методы формирования траектории электрода-инструмента при электроэрозионном фрезеровании (ЭЭФ) пространственно-сложных поверхностей (ПСП) А.П. Малахинский, И.Р. Паленов, В.В. Дольников, И.В. Суминов	50
Методы и технологии лазерной обработки: сравнительный анализ и тенденции развития С.Н. Григорьев, С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова, П.А. Подрабинник, Е.С. Сотова	64
Влияние технологических режимов вакуумно-дугового осаждения на толщину и износостойкость покрытия Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N Е.С. Сотова, Е.П. Попельшкин, М.В. Чупров, У.А. Сульдяйкина, В.Д. Гурин, Е.Ю. Кропоткина, С.Н. Григорьев	71

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Формализация требований к структуре технологического процесса на основе информации из PMI (Product and Manufacturing Information) А.А. Кутин, К.А. Хайбуллов, В.И. Левчук	81
Оценка технологичности конструкции сложных деталей, изготавливаемых по аддитивным технологиям, с учетом толщины слоев на ранних стадиях проектирования Г.Х. Ирзаев	91
Методология создания цифровых двойников роботизированных технологических ячеек на основе офлайн-программирования в среде Р-ПРО К.Н. Гавариева, Р.В. Гавариев, А.И. Фасхутдинов	105
Деформирующий инструмент для формовочной вальцовки С.А. Рогулин, Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин, Е.А. Яновская	115
Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей: сравнительный анализ, моделирование и оценка эффективности А.В. Паслён, Н.В. Коробова	125

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Разработка алгоритма верификации электронных компонентов, закупленных с привлечением посреднических структур Т.А. Кокоулина, А.В. Козлова	131
Автоматизация коррекции положения сопрягаемых деталей сильфонными приводами С.Н. Сысоев, В.С. Сидоров	139

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Использование выпуклых оболочек для решения задачи преследования – уклонения манипулятора от движущегося объекта Д.В. Ларичев, М.М. Стебулянин	149
Комбинированный метод захвата для двухпальцевых захватных устройств Д.Д. Подколзин	156

CONTENTS

**TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL
AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING**

Enhancing the corrosion resistance of stainless steel products by depositing modifying coatings on their surfaces – comprising materials with positive and negative electrode potentials – under optimally selected deposition process parameters P.Yu. Potapov, A.A. Vereshchaka, V.V. Zhilinski.....	8
Investigation of the adaptive properties of a modified PEO coating on the surface of D16 aluminum alloy V.A. Gaponov, S.N. Grigoriev, S.A. Kusmanov, T.L. Mukhacheva, I.V. Tambovskiy	25
Mathematical modeling and optimization of anodic plasma electrolytic carburizing parameters for commercially pure titanium VT1-0 V.A. Gaponov, T.L. Mukhacheva, I.V. Tambovskiy, I.A. Kusmanova, V.M. Feklistova.....	37
Methods of tool-electrode trajectory generation in electrical discharge milling (EDM) of spatially complex surfaces (SCS) A.P. Malakhinsky, I.R. Palenov, V.V. Dolnikov, I.V. Suminov	50
Laser processing methods and technologies: comparative analysis and development trends S.N. Grigoriev, S.R. Shekhtman, N.A. Sukhova, P.A. Podrabinnik, E.S. Sotova	64
Influence of technological modes of vacuum-arc deposition on the thickness and wear resistance of the Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N coating E.S. Sotova, E.P. Popelyshkin, M.V. Chuprov, U.A. Suldyaikina, V.D. Gurin, E.Yu. Kropotkina, S.N. Grigoriev	71

TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

Formalization of requirements to the technological process structure based on information from PMI (Product and Manufacturing Information)

A.A. Kutin, K.A. Khaibullov, V.I. Levchuk..... 81

Assessing the design manufacturability of complex additively manufactured components, taking layer thickness into account at early design stages

G.Kh. Irzaev 91

Methodology for creating digital twins of robotic process cells based on offline programming in the R-PRO environment

K.N. Gavarieva, R.V. Gavariyev, A.I. Faskhutdinov 105

TECHNOLOGIES AND MACHINES FOR PRESSURE PROCESSING

Deforming tool for forming rolling

S.A. Rogulin, E.N. Sosenushkin, A.E. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya 115

Reverse drawing of axisymmetric parts: comparative analysis, modelling and efficiency assessment

A.V. Paslen, N.V. Korobova..... 125

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

Development of an algorithm for verifying imported electronic components under sanctions restrictions

T.A. Kokoulina, A.V. Kozlova..... 131

Automation of position correction for mating parts using bellows drives

S.N. Sysoev, V.S. Sidorov 139

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Using convex hulls to solve the problem of a manipulator pursuing and evading a moving object

D.V. Larichev, M.M. Stebulyanin 149

A Combined Grasping Method for Two-Finger Grippers

D.D. Podkolzin..... 156

Оригинальная статья

УДК 620.1

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_8

**Павел Юрьевич Потапов^{1,2}, Алексей Анатольевич Верещака^{3,2},
Валерий Викторович Жилинский⁴**

¹ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
Королев, Россия

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

³ Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук
Москва, Россия

⁴ Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПУТЕМ ОСАЖДЕНИЯ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ, ВКЛЮЧАЮЩИХ МАТЕРИАЛЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ, ПРИ РАЦИОНАЛЬНО ПОДОБРАННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ

Аннотация

Предложена и апробирована концепция повышения коррозионной стойкости изделий из нержавеющей стали путем осаждения на их поверхности модифицирующих покрытий, включающих материалы с положительным и отрицательным электродным потенциалом, при рационально подобранных параметрах процесса осаждения. Исследовались свойства покрытий с внешним слоем на основе нитрида циркония (ZrN), с адгезионно-коррозионностойкими слоями Zr-Cu-Zr, Cr-Cu-Cr и Cu-Zr. Были подобраны параметры процесса, обеспечивающие осаждения равномерного по толщине и структуре слоя меди с наибольшей скоростью осаждения. Применение предложенных покрытий позволяет снизить интенсивность коррозии до 10 раз по сравнению с образцом без покрытия и до 3,5 раз по сравнению с покрытиями с адгезионным слоем без меди (только цирконий или только хром).

Ключевые слова: контролируемое ускоренное дуговое осаждение из газовой фазы, покрытия, коррозия, электродный потенциал, медь

Для цитирования: Потапов П.Ю., Верещака А.А., Жилинский В.В. Повышение коррозионной стойкости изделий из нержавеющей стали путем осаждения на их поверхности модифицирующих покрытий, включающих материалы с положительным и отрицательным электродным потенциалом, при рационально подобранных параметрах процесса осаждения // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 8–24. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_8.

Original article

Pavel Yu. Potapov^{1,2}, Alexey A. Vereshchaka^{3,2}, Valery V. Zhilinski⁴

² Central Research Institute of Machine Building
Korolev, Russia

² Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

³ Institute for Design-Technological Informatics of Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

⁴ Belarusian State Technological University,
Minsk, Republic of Belarus

ENHANCING THE CORROSION RESISTANCE OF STAINLESS STEEL PRODUCTS BY DEPOSITING MODIFYING COATINGS ON THEIR SURFACES – COMPRISING MATERIALS WITH POSITIVE AND NEGATIVE ELECTRODE POTENTIALS – UNDER OPTIMALLY SELECTED DEPOSITION PROCESS PARAMETERS

Abstract

This article proposes and tests a concept for increasing the corrosion resistance of stainless steel components by depositing modifying coatings on their surfaces, including materials with positive and negative electrode potentials, using carefully selected deposition parameters. The properties of coatings with an outer zirconium nitride (ZrN) layer and adhesion-corrosion-resistant Zr-Cu-Zr, Cr-Cu-Cr, and Cu-Zr layers were studied. Process parameters were selected to ensure the deposition of a copper layer uniform in thickness and structure with the highest deposition rate. The use of the proposed coatings reduces corrosion intensity by up to 10 times compared to an uncoated sample and up to 3.5 times compared to coatings with an adhesion layer without copper (zirconium or chromium only).

Keywords: controlled accelerated arc PVD, coatings, corrosion, electrode potential, copper

For citation: Potapov P.Yu., Vereshchaka A.A., Zhilinski V.V. Enhancing the corrosion resistance of stainless steel products by depositing modifying coatings on their surfaces – comprising materials with positive and negative electrode potentials – under optimally selected deposition process parameters. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 8–24. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_8. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 544.558+66.088

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_25

**Владислав Александрович Гапонов, Сергей Николаевич Григорьев,
Татьяна Леонидовна Мухачева, Иван Владимирович Тамбовский,
Сергей Александрович Кусманов**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЭО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

Аннотация

Исследованы процессы формирования и трибологические свойства адаптивных композиционных покрытий на алюминиевом сплаве Д16. Защитные слои получены комбинацией метода плазменно-электролитного оксидирования (ПЭО) и последующей вакуумной импрегнации пористой керамической матрицы жидким (И20А) и пластичным (ЛИТОЛ) смазочными материалами. Поведение гибридных структур изучено в условиях сухого трения по схеме «шар-диск» при нормальных нагрузках 5 и 10 Н. Визуализирована кинетика выхода смазочных материалов из пор покрытия в зависимости от температуры нагрева. Установлено, что при умеренных контактных нагрузках (5 Н) модифицированные слои демонстрируют эффект адаптивного самосмазывания (smart lubrication), фрикционный разогрев инициирует выделение смазки из пор, что приводит к формированию устойчивой трибопленки и снижению установившегося коэффициента трения до 0,12, что в 3,8 раза меньше по сравнению с исходной поверхностью. Доказано, что при увеличении нагрузки до 10 Н наибольшую эффективность показывает система «ПЭО+ЛИТОЛ». За счет прочного каркаса загустителя данный композит удерживает смазочную среду в зоне трибоконтакта, предотвращая макроразрушение и обеспечивая стабильный режим трения с коэффициентом 0,31.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, микродуговое оксидирование, покрытия, адаптивность, трибология

Для цитирования: Гапонов В.А., Григорьев С.Н., Мухачева Т.Л., Тамбовский И.В., Кусманов С.А. Исследование адаптивных свойств модифицированного ПЭО покрытия на поверхности алюминиевого сплава Д16 // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 25–36. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_25.

Original article

**Vladislav A. Gaponov, Sergey N. Grigoriev, Sergey A. Kusmanov,
Tatiana L. Mukhacheva, Ivan V. Tambovskiy**

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE ADAPTIVE PROPERTIES OF A MODIFIED PEO COATING ON THE SURFACE OF D16 ALUMINUM ALLOY

Abstract

The formation processes and tribological properties of adaptive composite coatings on the D16 aluminum alloy were investigated. The protective layers were produced using a combination of plasma electrolytic oxidation (PEO) and subsequent vacuum impregnation of the porous ceramic matrix with liquid (I20A) and grease (LITOL) lubricants. The behavior of the hybrid structures was evaluated under dry friction conditions using a ball-on-disk configuration at normal loads of 5 and 10 N. The kinetics of lubricant exudation from the coating pores as a function of heating temperature was visualized. It was established that under moderate contact loads (5 N), the modified layers exhibit an adaptive self-lubrication (smart lubrication) effect: frictional heating triggers the release of the lubricant from the pores, leading to the formation of a stable tribofilm and a reduction in the steady-state friction coefficient to 0.12, which is 3.8 times lower compared to the initial alloy. It was demonstrated that when the load is increased to 10 N, the “PEO + LITOL” system exhibits the highest efficiency. Owing to the strong framework of the thickener, this composite retains the lubricating medium within the tribocontact zone, preventing macro-destruction and ensuring a stable friction regime with a coefficient of 0.31.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, micro-arc oxidation, coatings, adaptability, tribology

For citation: Gaponov V.A., Grigoriev S.N., Kusmanov S.A., Mukhacheva T.L., Tambovskiy I.V. Investigation of the adaptive properties of a modified PEO coating on the surface of D16 aluminum alloy. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 25–36. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_25. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 544.558+66.088

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_37

**Владислав Александрович Гапонов, Татьяна Леонидовна Мухачева,
Иван Владимирович Тамбовский, Ирина Александровна Кусманова,
Виктория Михайловна Феклистова**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ АНОДНОЙ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА BT1-0

Аннотация

В статье представлены результаты исследования процесса анодной плазменно-электролитной цементации технически чистого титана BT1-0 с целью повышения его физико-механических и трибологических характеристик. Применение технического титана в высоконагруженных узлах трения строго ограничено его природной склонностью к адгезионному изнашиванию. Для решения этой проблемы применен метод анодного электролитно-плазменного насыщения в водных растворах на основе хлорида аммония и глицерина. Проведена комплексная оценка влияния технологических режимов (температуры, концентрации электролита, времени выдержки) на морфологию поверхности, шероховатость, микротвердость и износостойкость титана.

Установлено, что обработка снижает исходную шероховатость и повышает микротвердость приповерхностного слоя в 3,5 раза (до 850–900 HV_{0,01}). С использованием полного факторного эксперимента и функции желательности Харрингтона разработана предиктивная математическая модель в виде неполного полинома второй степени. Расчетным путем определены рациональные режимы модифицирования: концентрация хлорида аммония – 15% масс., температура обработки – 760 °С, время обработки – 6,5 мин. Контрольный эксперимент подтвердил высокую адекватность модели (относительная погрешность 10%) и достижение заданных трибологических свойств.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, математическое моделирование

Для цитирования: Гапонов В.А., Мухачева Т.Л., Тамбовский И.В., Кусманова И.А., Феклистова В.М. Математическое моделирование и оптимизация режимов анодной плазменно-электролитной цементации технически чистого титана BT1-0 // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 37–49. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_37.

Original article

**Vladislav A. Gaponov, Tatiana L. Mukhacheva, Ivan V. Tambovskiy,
Irina A. Kusmanova, Victoria M. Feklistova**

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF ANODIC PLASMA ELECTROLYTIC CARBURIZING PARAMETERS FOR COMMERCIALLY PURE TITANIUM VT1-0

Abstract

The article presents the results of a study on the anodic plasma electrolytic carburizing of commercially pure VT1-0 titanium to improve its physical-mechanical and tribological characteristics. The application of commercially pure titanium in high-load friction units is severely limited by its inherent tendency toward adhesive wear. To address this issue, the method of anodic plasma electrolytic saturation in aqueous solutions based on ammonium chloride and glycerol was applied. A comprehensive assessment of the effect of technological parameters (temperature, electrolyte concentration, and treatment time) on the surface morphology, roughness, microhardness, and wear resistance of titanium was conducted.

It was established that the treatment reduces the initial roughness and increases the microhardness of the near-surface layer by 3.5 times (up to 850–900 HV0.01). Using a full factorial experiment and Harrington’s desirability function, a predictive mathematical model was developed in the form of an incomplete second-degree polynomial. Rational modification parameters were determined computationally: ammonium chloride concentration of 15 wt.%, treatment temperature of 760 °C, and treatment time of 6.5 min. A control experiment confirmed the high adequacy of the model (10% relative error) and the achievement of the targeted tribological properties.

Keywords: plasma electrolytic treatment, mathematical modeling

For citation: Gaponov V.A., Mukhacheva T.L., Tambovskiy I.V., Kusmanova I.A., Feklistova V.M. Mathematical modeling and optimization of anodic plasma electrolytic carburizing parameters for commercially pure titanium VT1-0. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p.37–49–. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_37. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.9.048.4

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_50

**Александр Петрович Малахинский¹, Иван Романович Паленов¹,
Виктор Вадимович Дольников², Игорь Вячеславович Суминов¹**

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

² АО «ММЗ «АВАНГАРД»
Москва, Россия

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ (ЭЭФ) ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (ПСП)

Аннотация

В статье рассмотрено одно из решений проблемы обеспечения качества при обработке поверхностного слоя пространственно-сложных объектов из труднообрабатываемых сплавов посредством реализации метода электроэрозионного фрезерования (ЭЭФ) вращающимися цилиндрическими электродами-инструментами. ЭЭФ является сравнительно новой разновидностью обработки, получившей развитие только в последние годы благодаря адаптированному для этих целей оборудованию ЧПУ и устройств поддержания значения межэлектродного зазора. Данный метод обработки является гибридным, сочетающим механизм электроэрозионного воздействия, при котором разрушение поверхностного слоя происходит за счёт электрических разрядов, возникающих между электродом-инструментом и обрабатываемой заготовкой, и кинематику многоосевого фрезерования концевыми фрезами. Приводятся основные методы формирования траектории инструмента при ЭЭФ пространственно-сложных поверхностей (ПСП) и их влияние на качество поверхностного слоя

Ключевые слова: электроэрозионное фрезерование, пространственно-сложные поверхности, межэлектродный зазор, цилиндрический электрод-инструмент.

Для цитирования: Малахинский А.П., Паленов И.Р. Дольников В.В., Суминов И.В. Методы формирования траектории электрода-инструмента при электроэрозионном фрезеровании (ЭЭФ) пространственно-сложных поверхностей (ПСП) // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 50–63. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_50.

Original article

Alexander P. Malakhinsky¹, Ivan R. Palenov¹, Viktor V. Dolnikov², Igor V. Suminov¹

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”

Moscow, Russia

² JSC “MMZ “AVANGARD”

Moscow, Russia

METHODS OF TOOL-ELECTRODE TRAJECTORY GENERATION IN ELECTRICAL DISCHARGE MILLING (EDM) OF SPATIALLY COMPLEX SURFACES (SCS)

Abstract

This article discusses one of the solutions to the problem of ensuring quality in the processing of the surface layer of spatially complex objects made of difficult-to-process alloys by implementing the method of electric-discharge milling (EDM) with rotating cylindrical tool-electrodes. EDM is a relatively new type of processing that has only recently been developed due to the adaptation of CNC equipment and devices for maintaining the inter-electrode gap. This processing method is a hybrid that combines the mechanism of electroerosion, in which the surface layer is destroyed by electrical discharges between the tool electrode and the workpiece, and the kinematics of multi-axis milling with end mills. The article presents the main methods for generating the tool path during EDM of spatial-complex surfaces (SCS) and their impact on the quality of the surface layer.

Keywords: electric discharge milling, spatially complex surfaces, interelectrode gap, cylindrical electrode-tool.

For citation: Malakhinsky A.P., Palenov I.R., Dolnikov V.V., Suminov I.V. Methods of tool-electrode trajectory generation in electrical discharge milling (EDM) of spatially complex surfaces (SCS). *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 50–63. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_50. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.373

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_64

**Сергей Николаевич Григорьев, Семен Романович Шехтман,
Надежда Александровна Сухова, Павел Анатольевич Подрабинник,
Екатерина Сергеевна Сотова**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Аннотация

В статье рассматривается актуальность применения лазерной обработки в современном машиностроительном производстве при работе с различными материалами. Отмечаются основные направления развития способов лазерной обработки. В работе дан анализ потенциала лазерных технологий, позволяющих не только решать существующие задачи, связанные с обработкой деталей и поверхности, но и находить различные технологические решения в ключевых отраслях промышленности от авиадвигателестроения до энергетики и микроэлектроники. Приведены основные тренды развития лазерной обработки.

Ключевые слова: лазерная обработка, источники лазерного излучения, технология, аддитивные технологии, лазерная наплавка.

Для цитирования: Григорьев С.Н., Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Подрабинник П.А., Сотова Е.С. Методы и технологии лазерной обработки: сравнительный анализ и тенденции развития // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 64–70. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_64.

Original article

**Sergey N. Grigoriev, Semyon R. Shekhtman, Nadejda A. Sukhova, Pavel A. Podrabinnik,
Ekaterina S. Sotova**

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

LASER PROCESSING METHODS AND TECHNOLOGIES: COMPARATIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT TRENDS

Abstract

This article examines the relevance of laser processing in modern mechanical engineering when working with various materials. Key development trends in laser processing methods are outlined. The paper analyzes the potential of laser technologies to not only solve existing problems related to component and surface processing but also to find various technological solutions in key industries, from aircraft engine manufacturing to energy and microelectronics. Key trends in laser processing development are also presented.

Key words: laser processing, laser radiation sources, technology, additive technologies, laser cladding.

For citation: Grigoriev S.N., Shekhtman S.R., Sukhova N.A., Podrabinnik P.A., Sotova E.S. Laser processing methods and technologies: comparative analysis and development trends. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 64–70. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_64. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.9

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_71

**Екатерина Сергеевна Сотова, Егор Павлович Попельшукин,
Михаил Владиславович Чупров, Ульяна Артемовна Сульдьякина,
Владимир Дмитриевич Гурин, Елена Юрьевна Кропоткина,
Сергей Николаевич Григорьев**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ НА ТОЛЩИНУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЯ CR-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N

Аннотация

В статье исследуются закономерности формирования толщины многокомпонентного покрытия Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N, наносимого методом вакуумнодугового осаждения (ArcPVD) на твердосплавные пластины. Цель работы – установление количественных зависимостей толщины покрытия от технологических режимов осаждения (токов дуги катодов хрома и Ti-Al-Si, напряжения смещения на подложке и времени процесса) и получение регрессионной модели для инженерного прогнозирования. Для достижения цели применен дробный факторный эксперимент (матрица 8 опытов + 3 центральные точки) с варьированием 4х факторов на 3х уровнях. Толщину покрытия определяли по геометрическим параметрам лунок износа, сформированных методом Calowear, с использованием оптической микроскопии. По результатам метода наименьших квадратов построена степенная модель, адекватность которой проверена по критериям Стьюдента и Фишера. Установлено, что толщина покрытия практически линейно растет с увеличением времени осаждения (показатель степени 1,14), токи дуги катодов влияют сублинейно, причём вклад катода Ti-Al-Si в ~1,5 раза сильнее, чем катода Cr. Напряжение смещения в диапазоне 50–150 В статистически незначимо из-за конкуренции процессов уплотнения и ионного распыления. Полученная модель ($R^2 = 0,973$) обеспечивает среднюю ошибку аппроксимации 6,3% и рекомендуется для назначения технологических режимов в пределах исследованной области факторного пространства.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое осаждение, ArcPVD, нитридное покрытие, толщина покрытия, дробный факторный эксперимент, регрессионная модель, износостойкость, твердый сплав

Для цитирования: Сотова Е.С., Попельшукин Е.П., Чупров М.В., Сульдьякина У.А., Гурин В.Д., Кропоткина Е.Ю., Григорьев С.Н. Влияние технологических режимов вакуумно-дугового осаждения на толщину и износостойкость покрытия Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 71–80. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_71.

Original article

Ekaterina S. Sotova, Egor P. Popelyshkin, Mikhail V. Chuprov, Uliana A. Suldyaikina, Vladimir D. Gurin, Elena Yu. Kropotkina, Sergey N. Grigoriev

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF VACUUM-ARC DEPOSITION ON THE THICKNESS AND WEAR RESISTANCE OF THE CR-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N COATING

Abstract

This article examines the formation patterns of the thickness of a multicomponent Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N coating applied by arc PVD on carbide inserts. The aim of the study was to establish quantitative relationships between coating thickness and deposition process conditions (arc currents of the Cr and Ti-Al-Si cathodes, substrate bias voltage, and process time) and to develop a regression model for engineering forecasting. To achieve this goal, a fractional factorial experiment (a matrix of 8 experiments + 3 central points) was used, varying 4 factors at 3 levels. Coating thickness was determined based on the geometric parameters of wear craters formed by the Calowear method using optical microscopy. A power-law model was constructed based on the results of the least-squares method, the adequacy of which was tested using the Student and Fisher criteria. It was found that the coating thickness increases almost linearly with increasing deposition time (exponent of 1.14). The cathode arc currents have a sublinear effect, with the contribution of the Ti-Al-Si cathode being approximately 1.5 times greater than that of the Cr cathode. Bias voltage in the 50–150 V range is statistically insignificant due to competition between compaction and ion sputtering processes. The resulting model ($R^2 = 0.973$) provides an average approximation error of 6.3% and is recommended for assigning process conditions within the studied region of the factor space.

Key words: vacuum-arc deposition, ArcPVD, nitride coating, coating thickness, fractional factorial design, regression model, wear resistance, cemented carbide

For citation: Sotova E.S., Popelyshkin E.P., Chuprov M.V., Suldyaikina U.A., Gurin V.D., Kropotkina E.Yu., Grigoriev S.N. Influence of technological modes of vacuum-arc deposition on the thickness and wear resistance of the Cr-CrN-(Ti,Al,Si,Cr)N coating. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 71–80. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_71. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 67.02

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_81

***Андрей Анатольевич Кутин, Константин Анатольевич Хайбуллов,
Владимир Игоревич Левчук***

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ PMI (PRODUCT AND MANUFACTURING INFORMATION)

Аннотация

В условиях перехода к проектированию и производству, при котором 3D-модель изделия становится основным источником информации, MBD – Model-Based Definition), и безбумажным технологиям производства, вся необходимая информация о детали (геометрические размеры, допуски, шероховатости, базы, технические требования и др.) содержится в 3D-модели. Для этого подхода требуется formalизовать правила извлечения и интерпретации данных об изделии и производстве, чтобы на их основе формировать структуру технологического процесса. Целью исследования является разработка формализованной модели требований к структуре технологического процесса механической обработки на основе информации из PMI 3D-детали. Это позволит сократить время подготовки производства, снизить количество ошибок и повысить уровень интеграции между проектированием и производством.

Ключевые слова: MBD, PMI, 3D-модель, автоматизированное проектирование, технологический процесс, технические требования, размеры

Для цитирования: Кутин А.А., Хайбуллов К.А., Левчук В.И. Формализация требований к структуре технологического процесса на основе информации из PMI (Product and Manufacturing Information) // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 81–90. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_81.

Original article

Andrey A. Kutin, Konstantin A. Khaibullov, Vladimir I. Levchuk

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

FORMALIZATION OF REQUIREMENTS TO THE TECHNOLOGICAL PROCESS STRUCTURE BASED ON INFORMATION FROM PMI (PRODUCT AND MANUFACTURING INFORMATION)

Abstract

In the context of the transition to design and production, in which the 3D model of the product becomes the main source of information (MBD – Model-Based Definition), and paperless production technologies, all the necessary information about the part (geometric dimensions, tolerances, roughness, bases, technical requirements, etc.) is contained in the 3D model. This approach requires formalizing the rules for extracting and interpreting product and manufacturing data in order to form the structure of the technological process based on them. The purpose of the research is to develop a formalized model of the requirements for the structure of the technological process of mechanical processing based on information from the PMI of a 3D part. This will reduce pre-production time, reduce errors, and increase the level of integration between design and production.

Key words: MBD, PMI, 3D-model, computer-aided design, technological process, technical requirements, dimensions

For citation: Kutin A.A., Khaibullov K.A., Levchuk V.I. Formalization of requirements to the technological process structure based on information from PMI (Product and Manufacturing Information). *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 81–90. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_81. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 658.512.26:621.762

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_91

Гамид Хайбулаевич Ирзаев

Дагестанский государственный технический университет
Махачкала, Россия

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ, С УЧЕТОМ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация

В условиях растущей конкуренции и быстро меняющейся динамики рынка растет спрос на изделия аддитивного производства. На первый план выдвигается свойство технологичности конструкции деталей, которое закладывается конструктором на ранних этапах проектирования.

Целью исследования является разработка численного метода предварительной оценки технологичности конструкции деталей, изготавливаемых по технологии селективного лазерного сплавления, с учетом влияния толщины слоя и геометрической сложности на время реализации процесса. Проведенный обзор публикаций показал, что подходы к оценке технологичности конструкций деталей аддитивного производства выполняются проектировщиками на основе количественных показателей либо качественных знаний специалистов. Многие исследователи изучают корреляционные связи технологичности с типом материала, качеством поверхности, сходством характеристик, сложностью формы, отношением объема к площади поверхности, но крайне мало работ, оценивающих технологичность через связь с толщиной слоя, наносимого установкой селективного лазерного сплавления. Показано, что время изготовления и геометрическая точность являются критически важными факторами при оценке технологичности изготовления геометрически сложных деталей и напрямую влияют на себестоимость и качество изделий, их способность эффективно выполнять свои функции.

Предложены расчетные показатели эффективности использования проектного пространства, дающие представление о геометрической сложности деталей: коэффициенты линейной и радиальной сложности детали, общий коэффициент объемной сложности, коэффициенты толщины и глубины детали. Разработан метод предварительной количественной оценки технологичности, интегрирующий оценку геометрической сложности детали со скоростью ее построения с учетом толщины слоя в процессе селективного лазерного сплавления. Предложена модель поэтапной оценки технологичности сложных деталей, облегчающая конструктору практическую реализацию метода.

Апробация модели с имитированием реальных условий и ограничений производства была проведена для двух деталей. Расчеты показали, что компактная геометрия, оптимальное распределение материала и высокая эффективность скорости построения имеют решающее значение для повышения технологичности. Метод позволяет конструктору на ранних этапах проектирования быстро сравнить несколько альтернативных вариантов конструкции детали с выбором наиболее технологичного из них.

Ключевые слова: аддитивное производство, геометрическая сложность изготовления, деталь, ограничивающая фигура, селективное лазерное сплавление, скорость сканирования, технологичность конструкции, толщина слоя.

Для цитирования: Ирзаев Г.Х. Оценка технологичности конструкции сложных деталей, изготавливаемых по аддитивным технологиям, с учетом толщины слоев на ранних стадиях проектирования // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 91–104. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_91.

Original article

Gamid Kh. Irzaev

Dagestan State Technical University
Makhachkala, Russia

ASSESSING THE DESIGN MANUFACTURABILITY OF COMPLEX ADDITIVELY MANUFACTURED COMPONENTS, TAKING LAYER THICKNESS INTO ACCOUNT AT EARLY DESIGN STAGES

Abstract

In an increasingly competitive and rapidly changing market environment, demand for additively manufactured products is growing. The manufacturability of component designs, which is established by the designer in the early stages of design, is becoming increasingly important. The aim of the study is to develop a numerical method for preliminary assessment of the manufacturability of the design of parts manufactured using selective laser melting technology, taking into account the influence of layer thickness and geometric complexity on the process implementation time. A review of publications revealed that designers approach the manufacturability assessment of additively manufactured component designs based on quantitative indicators or the qualitative knowledge of specialists. Many researchers study the correlations between manufacturability and material type, surface quality, characteristic similarity, shape complexity, and volume-to-surface area ratio, but very few studies evaluate manufacturability through its relationship with the layer thickness applied by a selective laser melting system. It is shown that manufacturing time and geometric accuracy are critical factors in assessing the manufacturability of geometrically complex components and directly impact the cost and quality of the components, as well as their ability to effectively perform their functions.

Calculated indicators for the efficient use of design space are proposed, providing insight into the geometric complexity of components: coefficients of linear and radial complexity of the component, the overall coefficient of volumetric complexity, and coefficients of thickness and depth of the component. A method for preliminary quantitative assessment of manufacturability has been developed. This method integrates the assessment of the geometric complexity of a part with its construction speed, taking into account the layer thickness during selective laser melting. A model for a step-by-step assessment of the manufacturability of complex parts is proposed, facilitating the practical implementation of the method by the designer. The model was tested using two parts, simulating real-world conditions and production constraints. Calculations showed that compact geometry, optimal material distribution, and high construction speed are crucial for improving manufacturability. The method allows the designer to quickly compare several alternative part designs at the early stages of design, selecting the most manufacturable one.

Keywords: additive manufacturing, geometric complexity, component, constraint, selective laser melting, scanning speed, design manufacturability, layer thickness.

For citation: Irzaev G. Kh. Assessing the design manufacturability of complex additively manufactured components, taking layer thickness into account at early design stages. *Vestnik MSUT "Stankin"*, 2026, No 3 (78), p. 91–104. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_91. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.865

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_105

**Ксения Николаевна Гавариева¹, Ренат Вильсорович Гавариев²,
Айрат Ибрагимович Фасхутдинов^{1, 2, 3}**

¹ ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Набережные Челны, Россия

² Набережночелнинский филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
Набережные Челны, Россия

³ Публичное акционерное общество «КАМАЗ»
Набережные Челны, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ ОФЛАЙН-ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СРЕДЕ Р-ПРО

Аннотация

Традиционное онлайн-программирование не позволяет гарантировать воспроизводимость траекторий и устойчивость к возмущениям технологической системы из-за ограниченной сложности управляющих движений и значительных простоев оборудования, что особенно критично при частой смене номенклатуры. В качестве методологической основы предложен подход к офлайн-программированию на базе отечественного программного комплекса, интегрирующего цифровой двойник роботизированной ячейки, что обеспечивает перенос этапов отладки, верификации и оптимизации в виртуальную среду без остановки физического производства. Научная новизна заключается в разработке алгоритмов кинематической и динамической оптимизации перемещений, базирующихся на иерархической системе ограничений скоростей, ускорений и рывков, предиктивной коррекции столкновений и построении циклограмм для минимизации такта. Эти механизмы, учитывающие динамику приводов и упругие деформации звеньев, позволяют сократить время цикла на 18–30% без потери точности позиционирования, что прямо влияет на производительность и ритмичность технологического процесса.

Экспериментальная апробация проведена на сварочной ячейке ПАО «КАМАЗ» при изготовлении кронштейнов крепления топливного бака.

Ключевые слова: офлайн-программирование, цифровой двойник, Р-ПРО, промышленные роботы, мультивендорность, калибровка, имитационное моделирование, КАМАЗ, точность позиционирования, технологическая подготовка, переналадка, циклограмма

Для цитирования: Гавариева К.Н., Гавариев Р.В., Фасхутдинов А.И. Методология создания цифровых двойников роботизированных технологических ячеек на основе офлайн-программирования в среде Р-ПРО // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 105–114. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_105.

Original article

Ksenia N. Gavarieva¹, Renat V. Gavariyev², Airat I. Faskhutdinov^{1, 2, 3}

¹ Kazan (Volga region) Federal University
Naberezhnye Chelny, Russia

² Naberezhnye Chelny Branch of the Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev – KAI
Naberezhnye Chelny, Russia

³ Public Joint-Stock Company “KAMAZ”
Naberezhnye Chelny, Russia

METHODOLOGY FOR CREATING DIGITAL TWINS OF ROBOTIC PROCESS CELLS BASED ON OFFLINE PROGRAMMING IN THE R-PRO ENVIRONMENT

Abstract

It is substantiated that conventional online programming does not guarantee trajectory repeatability and robustness against disturbances of the technological system, owing to limited complexity of control motions and significant equipment downtime, which is especially critical with frequent product changeovers. As a methodological foundation, an offline programming approach based on a domestic software suite integrating a digital twin of the robotic cell is proposed, which enables the transfer of debugging, verification, and optimization stages into a virtual environment without interrupting physical production.

A six-stage methodology for technological preparation of control programs has been developed, including import of CAD models of tooling and workpieces, configuration of kinematic links taking into account actual geometric and stiffness characteristics of the manipulator, formalization of interaction logic with external equipment, trajectory programming with tool orientation, simulation verification of collisions and singular configurations, and post-processing for various controller types. The scientific novelty lies in the development of kinematic and dynamic motion optimization algorithms based on a hierarchical system of velocity, acceleration, and jerk constraints, predictive collision correction, and cyclogram construction for cycle-time minimization. These mechanisms, accounting for drive dynamics and elastic deformations of links, allow reducing the cycle time by 18–30% without loss of positioning accuracy, which directly affects productivity and rhythm of the technological process.

Experimental validation was performed on a welding cell at KAMAZ PJSC during the manufacture of fuel-tank mounting brackets.

Keywords: offline programming, digital twin, R-PRO, industrial robots, multivendor capability, calibration, simulation modeling, KAMAZ, positioning accuracy, technological preparation, changeover, cyclogram

For citation: Gavarieva K.N., Gavariyev R.V., Faskhutdinov A.I. Methodology for creating digital twins of robotic process cells based on offline programming in the R-PRO environment. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 105–114. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_105. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.77: 621.7.07

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_115

***Сергей Александрович Рогулин, Евгений Николаевич Сосенушкин,
Александр Евгеньевич Сосенушкин, Елена Александровна Яновская***

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

ДЕФОРМИРУЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМОВОЧНОЙ ВАЛЬЦОВКИ

Аннотация

Из существующих способов предварительного профилирования фасонных заготовок вальцовка является предпочтительной технологией, обладающей рядом преимуществ, среди которых небольшие габариты оборудования и простота его наладки и обслуживания, сравнительно низкие силы деформирования, связанные с локализацией очага пластической деформации, относительная простота деформирующего инструмента, точность и повторяемость формы и размеров получаемых фасонных полуфабрикатов. Все это способствует снижению себестоимости штампованных поковок. Полученные профилированные заготовки штампуются в окончательном ручье штампа кривошипного горячештамповочного пресса. Количество и распределение облоя при окончательном формоизменении во многом зависит от специфики спроектированных калибров секторов-штампов. При использовании калибров постоянного сечения не учитывается изменение площади поперечного сечения по длине деформируемой заготовки. В этом случае упрощается расчетная часть технологической подготовки производства, касающаяся проектирования профильной заготовки по переходам и геометрии соответствующих калибров. Недостатком является увеличенное количество металла, выходящего в облой, что снижает коэффициент использования металла заготовки. В условиях массового производства удлинённых в плане поковок в кузнечном цехе скапливается большое количество отходов, подлежащих утилизации, что повышает себестоимость окончательной продукции. Этого можно частично избежать, применяя калибры секторов-штампов переменного сечения несмотря на то, что расчетная часть при проектировании как геометрии профилируемых заготовок, так и рабочих частей калибров усложняется. В том и другом случаях существует необходимость выявления возможных ошибок проектирования с использованием компьютерного моделирования и их корректирования до начала производства, кроме того, цифровые модели расширяют число расчетных параметров моделируемого технологического процесса. Окончательно убедиться в адекватности проектирования и моделирования требуемой технологии можно только после пробной вальцовки. В статье предложена методика изготовления деформирующего инструмента формовочной вальцовки для проведения физических экспериментов с целью устранения возможных неточностей проектирования, не выявленных на этапе компьютерного моделирования.

Ключевые слова: формовочная вальцовка, секторы-штампы, фасонные заготовки.

Для цитирования: Рогулин С.А., Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А. Деформирующий инструмент для формовочной вальцовки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 115–124. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_115.

Original article

***Sergey A. Rogulin, Evgeny N. Sosenushkin,
Aleksandr E. Sosenushkin, Elena A. Yanovskaya***

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DEFORMING TOOL FOR FORMING ROLLING

Abstract

Among existing methods for pre-profiling shaped blanks, rolling is the preferred technology, offering several advantages, including small equipment dimensions and ease of maintenance, relatively low deformation forces associated with the localization of the plastic deformation site, the relative simplicity of the forming tool, and the accuracy and repeatability of the shape and dimensions of the resulting shaped semi-finished products. All of this contributes to a reduction in the cost of stamped forgings.

Keywords: forming rolling, sector dies, shaped blanks.

For citation: Rogulin S.A., Sosenushkin E.N., Sosenushkin A.E., Yanovskaya E.A. Deforming tool for forming rolling. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 115–124. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_115. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.983.3

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_125

Анастасия Владимировна Паслён, Наталья Васильевна Коробова

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Москва, Россия

РЕВЕРСИВНАЯ ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация

Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей рассматривается как перспективное направление развития процессов листовой штамповки, позволяющее перераспределять деформацию между стадиями формообразования, снижать число технологических переходов и повышать устойчивость получения тонкостенных полых изделий. Актуальность исследования определяется необходимостью повышения точности геометрии, уменьшения разностенности и сокращения затрат на отладку штамповой оснастки в серийном производстве, где традиционные многооперационные схемы нередко оказываются избыточно трудоемкими. Целью работы является сравнительный анализ реверсивной вытяжки осесимметричных деталей и оценка эффективности совмещенного инструмента на основе расчетного исследования процесса с использованием компьютерного моделирования.

В работе использованы аналитические соотношения для оценки усилий и контактных давлений, а также численное моделирование в программной среде DEFORM-2D/3D для двух последовательных стадий формоцилиндрической детали из коррозионностойкой стали 08X18H10 (AISI 304) толщиной 1,5 мм. В расчетной постановке рассмотрены параметры заготовки и инструмента, характерные для осесимметричной реверсивной вытяжки: исходный диаметр первой заготовки 602 мм, промежуточный диаметр после первой стадии 350 мм, конечный диаметр после второй стадии 225 мм, радиусы рабочих кромок 18,5 и 20 мм, а также геометрия зазоров, обеспечивающая направленное течение материала. Для сравнения использованы современные литературные данные по вытяжке с нетрадиционным инструментом, активному управлению напряженным состоянием и численному анализу глубоких вытяжных процессов.

Расчетно-модельное исследование показало, что реверсивная схема с совмещенной логикой проектирования инструмента обеспечивает технологически реализуемое формоизменение на двух стадиях без критической локализации деформации при выбранных параметрах заготовки и оснастки. Полученные оценки для первой и второй стадий показывают различие максимальных контактных давлений, что подтверждает необходимость раздельной оптимизации геометрии рабочих элементов по переходам. Научная новизна работы состоит в объединении литературного анализа и авторской расчетной постановки в единую схему оценки эффективности реверсивной вытяжки, где совмещенный инструмент трактуется как главный фактор управления формуемостью, точностью и устойчивостью процесса. Практическая значимость заключается в возможности использовать представленные результаты как основу для дальнейшей цифровой оптимизации оснастки и для разработки отдельной статьи, посвященной роли компьютерного моделирования в процессах листовой штамповки.

Ключевые слова: реверсивная вытяжка, осесимметричные детали, совмещенный инструмент, DEFORM-2D/3D, конечно-элементное моделирование, листовая штамповка, контактное давление, разностенность, технологическая эффективность

Для цитирования: Паслён А.В., Коробова Н.В. Реверсивная вытяжка осесимметричных деталей: сравнительный анализ, моделирование и оценка эффективности // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 125–130. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_125.

Original article

Anastasia V. Paslen, Natalia V. Korobova

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

REVERSE DRAWING OF AXISYMMETRIC PARTS: COMPARATIVE ANALYSIS, MODELLING AND EFFICIENCY ASSESSMENT

Abstract

Reverse drawing of axisymmetric parts is considered an advanced sheet-metal forming route because it redistributes deformation between stages, reduces the number of operations, and improves the manufacturability of thin-walled hollow parts. The topic is relevant due to increasing industrial demands for dimensional accuracy, lower wall-thickness variation, and reduced tooling adjustment costs in serial production, where conventional multi-stage deep drawing may be excessively labor-intensive. The purpose of this study is to compare reverse drawing approaches and to evaluate the efficiency of combined tooling using a computationally supported process analysis.

The study combines analytical estimations of drawing forces and contact pressures with numerical simulation in DEFORM-2D/3D for a two-stage forming route of a cylindrical stainless-steel part made of 08Kh18N10 (AISI 304) sheet with a thickness of 1.5 mm. The computational setup includes an initial blank diameter of 602 mm, an intermediate diameter of 350 mm after the first stage, a final diameter of 225 mm after the second stage, and working radii of 18.5 and 20 mm. Recent publications on unconventional tooling, active stress control, and finite-element analysis of deep drawing processes are used as the benchmark context for comparison.

The results show that the reverse route with a combined-tool design logic provides a technologically feasible two-stage forming process without critical strain localization for the selected geometry and material parameters. The estimated contact-pressure levels differ between the first and second stages, which confirms the need for stage-specific optimization of tool geometry. The novelty of the study lies in integrating the literature review with an original computational setup into a unified framework for assessing reverse drawing efficiency, where combined tooling is interpreted as the main control factor for formability, dimensional accuracy, and process stability. The practical significance of the paper is related to its use as a basis for further digital optimization of tooling and for a dedicated future study focused on the importance of computer modelling in sheet-metal forming.

Keywords: reverse drawing, axisymmetric parts, combined tooling, DEFORM-2D/3D, finite element modelling, sheet metal forming, contact pressure, wall-thickness variation, technological efficiency

For citation: Paslen A.V., Korobova N.V. Reverse drawing of axisymmetric parts: comparative analysis, modelling and efficiency assessment. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 125–130. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_125. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 338.364

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_131

Татьяна Александровна Кокоулина, Александра Владимировна Козлова

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Москва, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЕРИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ, ЗАКУПЛЕННЫХ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ПОСРЕДНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Аннотация

В настоящей статье проведен анализ проблем, связанных с закупкой электронных компонентов, приобретенных у посредника. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения технологической независимости промышленных предприятий при невозможности закупки отдельных компонентов при отсутствии поставок от производителей.

В ходе работы идентифицированы основные риски, возникающие при приобретении компонентов через посредника, и для каждого из выявленных рисков предложены соответствующие меры их минимизации.

Особое внимание в статье уделено верификации закупаемых электронных компонентов как наиболее критичному и наименее формализованному процессу. Рассмотрены четыре основных этапа процедуры контроля: предъявление компонентов на контроль с установлением уровня дефектности, выбор способа контроля и определение объема выборки, проведение многоуровневой проверки параметров, а также оценка результатов и принятие решения относительно всей партии закупленных компонентов. На основе детализации указанных этапов составлен алгоритм проведения верификации, учитывающий специфику работы с новыми поставщиками и отсутствие накопленной статистики по качеству поставляемой продукции. Предложенный алгоритм может быть адаптирован под конкретные производственные задачи и использован в качестве методической основы при разработке внутренних регламентов верификации.

Ключевые слова: электронные компоненты, алгоритм, верификация, выборочный контроль, закупка, посредник

Для цитирования: Кокоулина Т.А., Козлова А.В. Разработка алгоритма верификации электронных компонентов, закупленных с привлечением посреднических структур // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 131–138. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_131.

Original article

Tatiana A. Kokoulina, Alexandra V. Kozlova

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR VERIFYING IMPORTED ELECTRONIC COMPONENTS UNDER SANCTIONS RESTRICTIONS

Abstract

This article analyzes the problems associated with the purchase of electronic components purchased from a intermediary. The relevance of this research is due to the need to ensure the technological independence of industrial enterprises in the event of the impossibility of purchasing individual components in the absence of supplies from manufacturers.

During the work, the main risks arising when purchasing components through a intermediary were identified, and appropriate measures were proposed to minimize each of the identified risks.

The article pays special attention to the verification of purchased electronic components as the most critical and least formalized process. It considers four main stages of the control procedure: presenting the components for control and determining the level of defectiveness, selecting the control method and determining the sample size, conducting a multi-level inspection, and evaluating the results and making a decision regarding the entire batch of purchased components. Based on the detailed description of these stages, an algorithm for verification has been developed, taking into account the specific features of working with new suppliers and the lack of accumulated statistics on the quality of the supplied products. The proposed algorithm can be adapted to specific production tasks and used as a methodological basis for developing internal verification regulations.

Keywords: electronic components, algorithm, verification, selective control, procurement, intermediary

For citation: Kokoulina T.A , Kozlova A.V. Development of an algorithm for verifying imported electronic components under sanctions restrictions. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 131–138. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_131. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.757

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_139

Сергей Николаевич Сысоев, Владислав Сергеевич Сидоров

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых
Владимир, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ СИЛЬФОННЫМИ ПРИВОДАМИ

Аннотация

В данном исследовании рассматривается проблема повышения эффективности автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка». Актуальность обусловлена тем, что сборка такого типа деталей требует более сложного функционального репертуара по сравнению с типом «вал-втулка», а существующие методы коррекции положения ограничены сложностью съёма и обработки информации о процессе сборки. Целью работы является расширение области практического применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка» путем совершенствования метода сопряжения деталей посредством анализа и синтеза функционирования сборочной системы. В качестве материалов и методов исследования использованы метод исследования функционально-физических связей (МИФФС), анализ вариантов ситуаций процесса сборки, а также компьютерное и натурное моделирование. Результатом работы явилось выявление и формализация существенных физических явлений, сопровождающих процесс сборки: угла наклона рычага управления и избыточного давления в рабочей камере сильфонного привода. Методом МИФФС показано, что совокупность этих признаков позволяет однозначно идентифицировать каждый из четырёх возможных сценариев процесса сборки. Научная новизна заключается, во-первых, в выявлении и формализации указанных признаков с установлением причинно-следственных связей между ними и сценариями сборки, а во-вторых, в обосновании использования сильфонного привода одновременно как в силовом, так и в информационном контуре. Разработаны блок-схема алгоритма определения направления коррекции и структурная схема корректирующей системы. Практическая значимость подтверждена макетированием, машинными и натурными экспериментами, что доказывает эффективность предложенного метода и расширяет область практического применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка».

Ключевые слова: автоматизированная сборка, осесимметричные детали, соединение «втулка-втулка», коррекция положения, сильфонный привод, метод исследования функционально-физических связей (МИФФС).

Для цитирования: Сысоев С.Н., Сидоров В.С. Автоматизация коррекции положения сопрягаемых деталей сильфонными приводами // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 139–148. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_139.

Original article

Sergey N. Sysoev, Vladislav S. Sidorov

Vladimir State University
Vladimir, Russia

AUTOMATION OF POSITION CORRECTION FOR MATING PARTS USING BELLOWS DRIVES

Abstract

This research addresses the problem of improving the efficiency of automated assembly of axisymmetric parts of the “bush-to-bush” type. The relevance is due to the fact that assembling such parts requires a more complex functional repertoire compared to the “shaft-to-bush” type, while existing position correction methods are limited by the difficulty of acquiring and processing information about the assembly process. The work aims to expand the practical application scope of automated assembly for axisymmetric bush-to-bush parts by improving the mating method through analysis and synthesis of the assembly system functioning. The materials and methods include the method of investigating functional-physical connections (MIFPC), analysis of assembly process scenarios, as well as computer-based and full-scale simulation. The results consist in identifying and formalizing the essential physical phenomena accompanying the assembly process: the tilt angle of the control lever and the overpressure in the working chamber of the bellows drive. Using the MIFPC, it is shown that the combination of these features allows unambiguous identification of each of the four possible assembly scenarios. The scientific novelty lies, firstly, in the identification and formalization of these features with the establishment of cause-and-effect relationships between them and the assembly scenarios, and secondly, in substantiating the use of the bellows drive simultaneously in power and in information contour. A flowchart of the correction direction determination algorithm and a structural diagram of the correction system have been developed. Practical significance is confirmed by bench modeling, computer-based and full-scale experiments, which proves the effectiveness of the proposed method and expands the practical application scope of automated assembly for axisymmetric bush-to-bush parts.

Keywords: automated assembly, axisymmetric parts, bush-to-bush joint, position correction, bellows drive, method of investigating functional-physical connections (MIFPC).

For citation: Sysoev S.N., Sidorov V.S. Automation of position correction for mating parts using bellows drives. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 139–148. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_139. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 621.865.8

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_149

Дмитрий Викторович Ларичев, Михаил Михайлович Стебулянин

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Москва, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫПУКЛЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРЕСЛЕДОВАНИЯ – УКЛОНЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Аннотация

При выполнении роботами вспомогательных операций, таких как фасовка продуктов на движущемся конвейере, возникает необходимость предотвращения столкновений не только инструмента и груза с оснасткой, но и тела манипулятора с препятствиями в рабочей зоне. Целью работы является создание плана разработки алгоритма уклонения манипуляционного робота от подвижного препятствия на основе применения выпуклых оболочек. Основной функционал проектируемого алгоритма заключается в расчёте расстояния между двумя ближайшими точками объемного звена и сферического препятствия. Для математического описания объектов сцены предлагается использовать выпуклые оболочки. Это открывает возможность применения пакета trimesh для создания высокоточных оболочек непосредственно из CAD-моделей робота и препятствий. В качестве метода вычисления расстояния между оболочками обосновывается выбор алгоритма Гилберта–Джонсона–Кирти, базирующегося на разности Минковского и функции поддержки, что обеспечивает вычислительную сложность $O(n)$ для многих динамических сцен. Для учета подвижности препятствия план предусматривает не только проверку текущей дистанции, но и проецирование препятствия вдоль вектора его скорости. Реализацию самого уклонения планируется выполнить на основе наиболее эффективных методик, известных из литературы. Представленный план определяет ключевые этапы разработки и закладывает основу для дальнейшей реализации алгоритма на системах реального времени.

Ключевые слова: манипуляционный робот, задача преследования-уклонения, выпуклые оболочки, алгоритм Гилберта–Джонсона–Кирти, разность Минковского, прямая задача кинематики

Для цитирования: Ларичев Д.В., Стебулянин М.М. Использование выпуклых оболочек для решения задачи преследования – уклонения манипулятора от движущегося объекта // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 149–155. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_149.

Original article

Dmitry V. Larichev, Mikhail M. Stebulyanin

Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

USING CONVEX HULLS TO SOLVE THE PROBLEM OF A MANIPULATOR PURSUING AND EVADING A MOVING OBJECT

Abstract

When robots perform auxiliary operations, such as packing products on a moving conveyor, it becomes necessary to prevent collisions not only of the tool and load with the tooling, but also of the manipulator body with obstacles in the work area. The aim of the work is to create a plan for the development of an algorithm for avoiding a manipulative robot from a moving obstacle based on the use of convex hulls. The main functionality of the designed algorithm is to calculate the distance between the two closest points of a three-dimensional link and a spherical obstacle. It is proposed to use convex hulls to mathematically describe the objects of the scene. This opens up the possibility of using the trimesh package to create high-precision shells directly from CAD models of the robot and obstacles. The choice of the Gilbert–Johnson–Kirtly algorithm based on the Minkowski difference and the support function, which provides an $O(n)$ computational complexity for many dynamic scenes, is justified as a method for calculating the distance between shells. To account for the mobility of the obstacle, the plan provides not only for checking the current distance, but also for projecting the obstacle along its velocity vector. The implementation of the avoidance itself is planned to be carried out on the basis of the most effective methods known from the literature. The presented plan defines the key stages of development and lays the foundation for further implementation of the algorithm on real-time systems.

Keywords: manipulative robot, pursuit-evasion problem, convex hulls, Gilbert–Johnson–Kirti algorithm, Minkowski difference, direct kinematics problem.

For citation: Larichev D.V., Stebulyanin M.M. Using convex hulls to solve the problem of a manipulator pursuing and evading a moving object. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 149–155. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_149. (In Russian)

Оригинальная статья

УДК 004.896

DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_156

Данил Денисович Подколзин^{1,2}

¹ Московский государственный технологический университет «Станкин»
Москва, Россия

² ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»
Москва, Россия

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ЗАХВАТА ДЛЯ ДВУХПАЛЬЦЕВЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ

Аннотация

В работе рассматривается задача выбора захвата для двухпальцевых захватных устройств (ЗУ) при выполнении операций захвата и переноса заранее неизвестных объектов, заданных неполным облаком точек. При использовании данных датчика глубины робот располагает только видимой частью поверхности объекта; при этом полная геометрия, масса и точное положение центра масс заранее неизвестны. Это затрудняет выбор конфигурации ЗУ, обеспечивающей удержание объекта после смыкания пальцев и при последующем подъеме. Целью исследования является разработка комбинированного метода выбора захвата, объединяющего геометрическую генерацию кандидатов, аналитическую оценку качества контактной конфигурации и учет расчетной направленной нагрузки при подъеме объекта. Генерация гипотез выполняется по неполному облаку точек на основе критерия антиподальности. Для проверки кандидатов используется аналитическая оценка на основе ϵ – метрики, а итоговое ранжирование дополняется оценкой расчетной нагрузки, возникающей на начальном этапе подъема. Экспериментальная проверка проведена в симуляционной среде PyBullet с использованием модели манипулятора UR5 и двухпальцевого ЗУ. Сравнение выполнено с геометрическим методом на основе критерия антиподальности и аналитическим методом, основанным на ϵ – метрике. Результаты показали увеличение процента успешных попыток выполнения полной последовательности захвата и переноса по сравнению с базовыми подходами в рассматриваемой симуляционной среде. Научная новизна заключается в объединении геометрического отбора, аналитической проверки силового замыкания и оценки качества контактной конфигурации и направленной оценки нагрузки в единой процедуре ранжирования кандидатов. Практическая значимость связана с использованием предложенного метода в алгоритмах выбора захвата по данным сенсоров глубины.

Ключевые слова: роботизированный захват; выбор захвата; антиподальный захват; силовое замыкание; облака точек; контактная механика.

Для цитирования: Подколзин Д.Д. Комбинированный метод захвата для двухпальцевых захватных устройств // Вестник МГТУ «Станкин». – 2026. – № 3 (78). – С. 156–170. – DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_156.

Original article

Danil D. Podkolzin^{1,2}

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”
Moscow, Russia

² FSUE “VNIIA named after N. L. Dukhov”
Moscow, Russia

A COMBINED GRASPING METHOD FOR TWO-FINGER GRIPPERS

Abstract

This paper addresses the problem of grasp selection for two-finger grippers performing grasping and transfer operations with previously unknown objects represented by incomplete point clouds. When depth sensor data are used, the robot has access only to the visible part of the object surface, while the complete geometry, mass, and exact position of the center of mass remain unknown in advance. This complicates the selection of a gripper configuration capable of securely holding the object after finger closure and during subsequent lifting. The aim of this study is to develop a combined grasp selection method integrating geometric candidate generation, analytical evaluation of contact configuration quality, and consideration of the estimated directional load arising during object lifting. Grasp hypotheses are generated from an incomplete point cloud using the antipodal grasp criterion. Candidate grasps are verified analytically using the ε -metric, while the final ranking is supplemented by an estimate of the load occurring at the initial stage of lifting. The proposed method was experimentally evaluated in the PyBullet simulation environment using a UR5 robotic manipulator equipped with a two-finger gripper. The method was compared with a geometric approach based on the antipodal grasp criterion and an analytical approach based on the ε -metric. The results demonstrated an increase in the success rate of completing the full grasp-and-transfer sequence compared with the baseline approaches under the considered simulation conditions. The scientific novelty of the study lies in combining geometric candidate selection, analytical verification of force closure and contact configuration quality, and directional load estimation within a unified grasp-ranking procedure. The practical significance of the proposed method is associated with its application in grasp selection algorithms based on depth sensor data.

Keywords: robotic grasping; grasp selection; antipodal grasp; force closure; point clouds; contact mechanics.

For citation: Podkolzin D.D. A combined grasping method for two-finger grippers. *Vestnik MSUT “Stankin”*, 2026, No 3 (78), p. 156–170. DOI 10.47617/2072-3172_2026_3_156. (In Russian)