

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

ISSN:2618-8201

№2 (34)

2024

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 2(34)

2024

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2024

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2024 г. №2 (34)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:

- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;*
- 2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы;*
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;*
- 2.6.17. Материаловедение; 4.3.3. Пищевые системы.*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

к.т.н., доцент Вожжов А.А.

Техн. секретарь:

к.т.н., Стадник Т.В.

Редакционная коллегия

Абдулгасис У.А., д.т.н., проф. (г. Симферополь); Бохонский А.И., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Гусев В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк); Дуюн Т.А., д.т.н., доц. (г. Белгород);

Карлов А.Г., к.т.н., доц. (г. Севастополь); Козлов А.М., д.т.н., проф. (г. Липецк);

Куликов Д.А., к.т.н., доц. (г. Москва); Лебедев В.А., к.т.н., проф. (г. Ростов-на-Дону);

Леонов С.Л., д.т.н., проф. (г. Барнаул); Лобанов Д.В., д.т.н., доц. (г. Чебоксары);

Малышева Г.В., д.т.н., проф. (г. Москва); Михайлов А.Н., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Носенко В.А., д.т.н., проф. (г. Волжский); Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Осипов К.Н., д.т.н., доц. (г. Севастополь); Полтавец В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Соколов С.А., д.т.н., проф. (г. Донецк); Сулов А.Г., д.т.н., проф. (г. Брянск);

Федонин О.Н., д.т.н., проф. (г. Брянск); Юшина Ю.К., д.т.н., проф. (г. Москва);

Якубов Ч.Ф., к.т.н., доц. (г. Симферополь); Ярошенко А.А., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Яшонков А.А., к.т.н., доц. (г. Керчь).

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.

Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».

Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 20.12.2024 г.

Тираж: 25 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 222, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.

Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Богущий В.Б.</i> О влиянии типа корреляционной функции на необходимое число измерений Ra	4
<i>Баев В.А., Карлов А.Г.</i> Анализ ресурсов повышения эффективности функционирования токарных станков с ЧПУ.....	10
<i>Вожжов А.А., Дробитько А.И.</i> Повышение производительности операции групповой упаковки за счет ускорения процесса транспортировки.....	17
<i>Ваниев Э.Р., Васильев А.В., Капаев К.С.</i> Модернизация токарно-револьверного станка 1A616 для повышения жесткости несущей системы за счет проведения модального анализа.....	25
<i>Тищенко И.В., Харченко А.О.</i> Обоснование комплексного подхода к поиску перспективных конструкций мелкогабаритных бесстружечных метчиков и оборудования для их изготовления.....	30

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Кузьмин В.И., Гуляев И.П., Сергачёв Д.В., Тамбовцев А.С., Тырышкин П.А., Палагушкин Б.В., Лебедев О.Ю., Мензилова М.Г.</i> Атмосферное воздушно-плазменное нанесение защитных покрытий.....	38
--	----

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Веляев Ю.О., Покинтелица Н.И., Светличная О.В., Еременко В.Г.</i> Изучение возможности выделения полисахаридной составляющей из некоторых гидробионтов черноморского бассейна.....	48
---	----

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.19

О ВЛИЯНИИ ТИПА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НА НЕОБХОДИМОЕ ЧИСЛО ИЗМЕРЕНИЙ Ra

В.Б. Богдацкий¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия;

АННОТАЦИЯ

В статье отмечается, что для нерегулярной шероховатости, характерной для финишных операций выполняемых абразивным инструментом, параметр шероховатости поверхности Ra носит статистический характер, а незначительная протяжённость трассы измерения вызывает значительное рассеивание результатов при определении характеристики шероховатости. Показано что необходимое число измерений параметра Ra его математическое ожидание и дисперсия зависят от интервала корреляции. Для определения необходимого числа измерений были применены два типа корреляционных функций: убывающие монотонно и убывающие с периодической составляющей, что характерно для нерегулярной шероховатости. Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что количество измерений Ra зависит не от типа корреляционной функции, а от длины интервала корреляции, а число измерений увеличивается при более низких классах шероховатости поверхности, так как для них интервал корреляции больше.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, точность измерения, корреляционная функция.

ABOUT THE IMPACT OF THE TYPE OF CORRELATION FUNCTION ON THE REQUIRED NUMBER OF MEASUREMENTS Ra

V.B. Bogutsky¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia;

ABSTRACT

The article notes that for the irregular roughness characteristic of finishing operations performed by an abrasive tool, the surface roughness parameter Ra is statistical in nature, and the insignificant length of the measurement route causes a significant dispersion of the results when determining the roughness characteristics. It is shown that the required number of measurements of the parameter Ra , its mathematical expectation and variance depend on the correlation interval. To determine the required number of measurements, two types of correlation functions were used: decreasing monotonously and decreasing with a periodic component, which is typical for irregular roughness. The performed analysis allows us to conclude that the number of Ra measurements does not depend on the type of correlation function, but on the length of the correlation interval, and the number of measurements increases at lower purity classes, since the correlation interval for them.

Keywords: surface roughness, measurement accuracy, correlation function.

Введение. Для нерегулярной шероховатости, характерной для большинства финишных операций, параметр Ra носит статистический характер. Незначительная протяжённость трассы измерения вызывает значительное рассеивание результатов при определении характеристики шероховатости Ra [1-4 и др.]. В связи с этим необходимо установить длину трассы и число измерений, обеспечивающих получение результата с заданной точностью.

В работах [5-8] профиль шероховатости поверхности рассматривался как реализация стационарного нормального случайного процесса $h(x)$ с непрерывной корреляционной функцией получены зависимости, позволяющие вычислить количество измерений рассматриваемого параметра Ra . В соответствии с предельной теоремой, полученное на основе экспериментальных данных выборочное среднее R'_a , имеет асимптотически нормальное распределение.

При заданной величине погрешности ε и значении доверительной вероятности β из уравнения вероятности (1) можно определить требуемое количество измерений n (2).

$$|Ra - E\{Ra\}| \leq t_\beta \sigma_{\bar{Ra}} = t_\beta \sqrt{\frac{D\{Ra\}}{n}}. \quad (1) \quad n = \frac{t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{D\{Ra\}}{E^2\{Ra\}}. \quad (2)$$

где t_β – табулированная величина, определяемая доверительной вероятностью [9]; $D\{Ra\}$ – дисперсия величины Ra ; $E\{Ra\}$ – математическое ожидание Ra .

Следовательно, для нахождения требуемого количества измерений величины Ra необходимо знать как математическое ожидание этой величины, так и ее дисперсию.

Изложение основного материала. Согласно выполненным исследованиям [5, 6, 10, 11 и др.] для расчета статистических характеристик параметра Ra (дисперсии и математического ожидания) необходимо знать двумерную плотность распределения случайных величин, содержащую нормированную корреляционную функцию. Согласно этому утверждению, дисперсия величины Ra определяется как быстро сходящийся ряд:

$$D\{Ra\} = \frac{4\sigma^2}{L^2} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)] \times \int_0^L \int_0^L \rho^{2i}(x_2 - x_1) dx_1 dx_2. \quad (3)$$

где $\rho(x_2 - x_1)$ – нормированная корреляционная функция профиля шероховатости поверхности, определяемая в зависимости от расстояний между сечениями с координатами x_1 и x_2 .

Так как члены уравнения с нечетными степенями равны нулю, то суммирование происходит по четным степеням ρ . В общем случае суммирование возможно осуществить по всем членам ряда и двойной интеграл будет иметь вид:

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho^i(x_2 - x_1) dx_1 dx_2.$$

Так как ряд (3) относится к быстро сходящимся [12], то вполне допустимо (без значимой потери точности) использовать только первый член ряда. Для оценки влияния корреляционной функции на требуемое количество базовых длин при измерении параметра Ra , проанализируем интеграл корреляционной функции при $i=1$:

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho(x_2 - x_1) dx_1 dx_2. \quad (4)$$

При замене x_2 на $\tau = x_2 - x_1$ [9] двойной интеграл (4) преобразится в единичный. В результате получим

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho(x_2 - x_1) dx_1 dx_2 = \int_0^L (L - \tau) [\rho(\tau) + \rho(-\tau)] d\tau.$$

Так как функция $\rho(\tau)$ является четной, т. е. $\rho(\tau) = \rho(-\tau)$, то

$$I = \int \int_0^L \rho(\tau) dx_1 dx_2 = 2 \int_0^L (L - \tau) \rho(\tau) d\tau, \quad (5)$$

Уравнение (5) можно представить как:

$$I = 2L \int_0^L \rho(\tau) d\tau - 2 \int_0^L \tau \rho(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Анализ зависимости (6) показывает, что при величине L , соответствующей реальной базовой длине, вторым интегралом можно пренебречь без существенной потери точности, т. е.

$$I \approx 2L \int_0^L \rho(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Для случайного стационарного процесса можно задать такой интервал τ_k , для которого при $\tau > \tau_k$, случайные величины можно принять некоррелированными. Значение τ_k можно рассчитать как размер основания прямоугольника с единичной высотой и площадью равной площади ограниченной кривой коэффициента корреляции [12], т. е.

$$\tau_k = \int_0^\infty \rho(\tau) d\tau. \quad (8)$$

В случае если величины L равны базовым длинам, интеграл в зависимости (7) можно приближенно выразить через интервал корреляции:

$$I \approx 2L \tau_k. \quad (9)$$

Анализ уравнения (9) показывает, что величина дисперсии параметра Ra и требуемое количество измерений n зависят от величины интервала корреляции.

В работах [13-15] было определено минимально необходимое количество измерений для монотонно убывающей корреляционной функции $\rho = e^{-\alpha|\tau|}$ и убывающей с периодической составляющей корреляционной функции $\rho = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega \tau$. Больше число измерений получается при корреляционной функции с периодической составляющей. Это подтверждает положение о том, что с увеличением интервала корреляции число измерений возрастает, поскольку у корреляционной функции $\rho = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega \tau$ интервал корреляции больше.

Для подтверждения полученного результата, можно рассмотреть формулу, выведенную в [13, 14], для монотонно убывающей корреляционной функции $\rho = e^{-\alpha|\tau|}$:

$$n = \frac{t_\beta^2}{2\varepsilon^2 L \alpha} \quad (10)$$

Для этой функции интервал корреляции будет определяется зависимостью

$$\tau_k = \int_0^\infty e^{-\alpha\tau} d\tau = \frac{1}{\alpha}. \quad (11)$$

Решая (11) находим зависимость для определения n через интервал корреляции:

$$n = \frac{t_\beta^2}{2\varepsilon^2 L} \tau_k \quad (12)$$

С ростом интервала корреляции количество требуемых измерений увеличивается.

Ввиду того что при равных интервалах корреляции числа измерений равны, используем интервал корреляции в качестве критерия для перехода от не дифференцируемых корреляционных функций к однотипным дифференцируемым функциям в формулах, определяющих необходимое число измерений Ra . Для последних параметры можно определить при помощи особых точек профиля. С помощью интервалов корреляции была найдена зависимость между коэффициентами корреляционных функций. Если интервалы

корреляции у обеих функций равны то на основании зависимости $\int_0^\infty e^{-\alpha\tau} d\tau = \int_0^\infty e^{-\beta^2\tau^2} d\tau$ получаем, что

$$\alpha = \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} \quad (13)$$

Используя связь между числом нулей и производными корреляционной функции [16, 17], получаем

$$\beta = \frac{\pi n(0)}{\sqrt{2}} \text{ или, учитывая (13), } \alpha = \sqrt{2}\pi n(0)$$

На рис. 1 показано изменение коэффициента α в зависимости от параметра Ra . Видно, что с уменьшением шероховатости коэффициент α возрастает, т.е. при более высоких классах чистоты корреляционная функция убывает быстрее. Аналогичный результат по изменению коэффициента α получен в [18] (см. пунктирная линия на рис. 1).

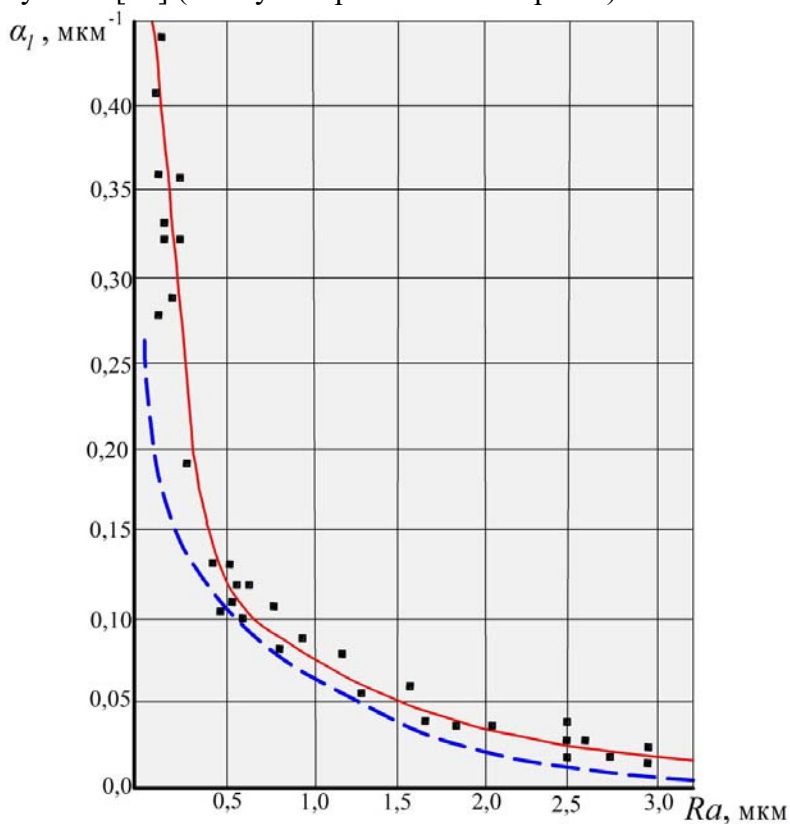


Рисунок 1. Изменение коэффициента α_l в зависимости от параметра Ra .

Такой же подход использован для корреляционных функций с периодической составляющей:

$$\rho = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_1 \tau \text{ и } \rho = \frac{\cos \omega_2 \tau}{1 + \gamma^2 \tau^2} \text{ при условии, что частоты периодической составляющей обеих}$$

функций равны, т. е. $\omega_1 = \omega_2$. Из равенства интервалов находим

$$\alpha = \frac{2\gamma}{\pi} \quad (14)$$

Коэффициенты γ и ω_2 можно определить по числу нулей и максимумов [16, 17].

На рис. 2 показаны обе корреляционные функции при равных интервалах. Отличие между ними незначительное, что позволяет сделать вывод о возможности использования переходной зависимости (14) в практических расчетах.

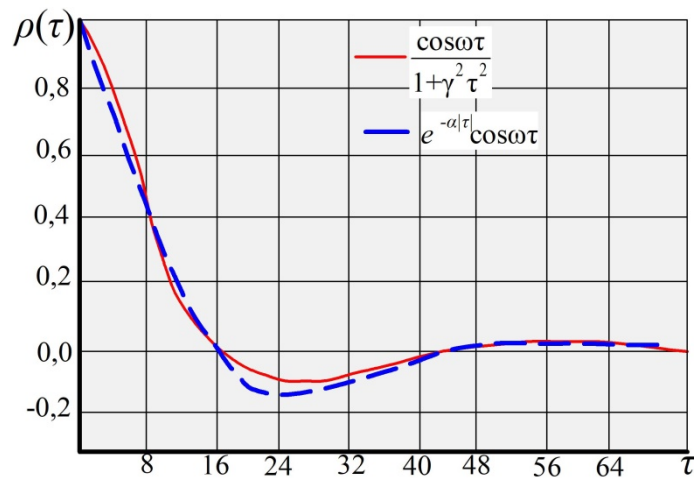


Рисунок 2. Дифференцируемая и недифференцируемая корреляционные функции при равных интервалах корреляции.

Таким образом, для нахождения требуемого количества измерений были применены корреляционные функции, свойственные для нерегулярной шероховатости: убывающие монотонно и убывающие с периодической составляющей. Каждая из них обладает своим интервалом корреляции и, соответственно, требует разное количество необходимых измерений.

В табл. 1 приведены некоторые дифференцируемые корреляционные функции нерегулярных профилей и соответствующие им выражения интервалов корреляции.

Таблица 1. Дифференцируемые корреляционные функции нерегулярных профилей и соответствующие интервалы корреляции

Нормированная корреляционная функция	Интервал корреляции
$\rho = e^{-\alpha^2 \tau^2}$	$\tau_k = \frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha}$
$\rho(\tau) = \frac{1}{1 + \gamma^2 \tau^2}$	$\tau_k = \frac{\pi}{2\gamma}$
$\rho = \frac{\cos \omega \tau}{1 + \gamma^2 \tau^2}$	$\tau_k \prec \frac{\pi}{2\gamma}$

Поскольку количество измерений Ra связано с интервалом корреляции, максимальное значение n будет достигнуто при корреляционной функции $\rho(\tau) = \frac{1}{1 + \gamma^2 \tau^2}$, а наименьшее при $\rho = e^{-\alpha^2 \tau^2}$.

Выводы. Выполненный анализ показал, что количество измерений Ra определяется не типом корреляционной функции, а длиной интервала корреляции. Так как при низких классах

шероховатости поверхности интервал корреляции больше то и необходимое количество измерений параметра Ra растет.

Список литературы

1. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности/ И.В. Дунин-, А.Н. Карташова. М: Машиностроение, 1987. – 231 с.
2. Макеев А.В. Анализ современных методов исследования шероховатости поверхности деталей/ А.В., Макеев, В.С. Айрапетян // Вестник СГГА. – 2014. – Вып.4 (28). – С. 80-86
3. Мальков О.В. Измерение параметров шероховатости поверхности детали./О.В Мальков, А.В. Литвиненко. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 22 с.
4. Давыдов В.М. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности/ В.М. Давыдов, В.В. Заев, П.Н. Паночевный и др. // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Том 4. – № 4. –С.1061-1074.
5. Malkin S. Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. Second edition. / S. Malkin, C. Guo. – Publ. by Industrial Press, 2008. – 320 p.
6. Овсянников В.Е.. Корреляционный анализ профиля шероховатости поверхности/ В.Е. Овсянников, В.Ю. Терещенко// Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 10. – С.74-78.
7. Абрамов А.Д. Определение шероховатости шлифованных поверхностей на основе анализа их автокорреляционных функций/ А.Д. Абрамов //Известия Самарского научного центра Российской академии наук., – 2008. – Т. 10. – №3 – С. 887-894.
8. Drbúll M. Analysis of roughness profile on curved surfaces/ M. Drbúll, P. Martikáň, J. Bronček, I. Litvaj, J. Svobodová//MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 244. – P.1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401024>
9. Мостеллер Ф. Вероятность. Перевод с англ. /Ф. Мостеллер, Р. Рурке, Дж. Томас. М.: МЦНМО, 2015. – 356 с.
10. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке./Ю.К. Новоселов. Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
11. Bogutsky V. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface./ V. Bogutsky, L. Shron, E. Yagyaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044117.
12. Прикладной анализ случайных процессов. Под ред. Прохорова С.А. СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
13. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход)/ А.П. Хусу, Ю.Р.. Витенберг, В.А. Пальмов. М.: Наука. 1975. – 343 с.
14. Stepien P. A probabilistic model of the grinding process. Applied Mathematical Modelling. – 2009. –Vol. 33(10). – P. 3863–3884.
15. Zhen Bing Hou. On the mechanics of the grinding process. Part I. Stochastic nature of the grinding process./ Zhen Bing Hou, R. Komanduri// International journal of machine tools & manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1579–1593.
16. Кузьмин В.П. Метод оценки вероятностей больших выбросов случайных процессов/ В.П. Кузьмин// Ученые записки ЦАГИ Том XXXIV. – 2003. – № 3-4. – С.109-123.
17. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов/ В.И. Тихонов. М.: Наука. 1970. – 392 с

18. Waechter M. Stochastic analysis of surface roughness/ M. Waechter, F. Riess, H.. Kantz, J. Peinke//EPL (Europhysics Letters). Published by IOP Publishing. – 2003. – Vol. 64(5). – P. 1-9.

УДК 621.7

АНАЛИЗ РЕСУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

***В.А. Баев¹,
А.Г. Карлов¹***

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия;

АННОТАЦИЯ

В условиях современного производства эффективность функционирования токарных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) становится ключевым фактором конкурентоспособности. Проведен анализ ресурсов, направленных на повышение этой эффективности, что имеет важное значение для автоматизированного машиностроения. Рассмотрены темы, связанные с оптимизацией технологических процессов на токарных станках с ЧПУ. Они включают в себя анализ современных технологий, влияние программного обеспечения на производительность, а также механизмы повышения точности обработки деталей. Обсуждаются практические методы повышения производительности, такие как внедрение автоматизации и оптимизация режимов резания. Кроме того, акцентируется внимание на важности квалификации операторов в управлении ЧПУ станками и правильного выбора инструментов.

Ключевые слова: ЧПУ, токарный станок, моделирование, компенсация погрешности.

ANALYSIS OF RESOURCES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF CNC LATHES

***V.A. Baev¹,
A.G. Karlov¹***

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia,

ABSTRACT

The topics related to the optimization of technological processes on CNC lathes are considered. They include the analysis of modern technologies, the impact of software on productivity, as well as mechanisms to improve the accuracy of machining parts. Practical methods for improving productivity, such as the introduction of automation and optimization of cutting modes, are discussed. In addition, attention is focused on the importance of the qualification of operators in the management of CNC machines and the correct choice of tools.

Keywords: CNC, lathe, modeling.

Введение. На сегодняшний день в России имеется большой парк станков с числовым программным управлением (ЧПУ), произведенных в 70-90-х, который неисправен или находится вне эксплуатации из-за устаревания систем ЧПУ. Для возврата этих станков в промышленное производство или в учебный процесс необходимо заменить устаревшие системы управления, то есть провести модернизацию. Для приобретения новых промышленных систем ЧПУ от ведущих производителей, таких как Fanuc, Siemens (Sinumeric), Heidenhain и других требуются достаточно большие финансовые затраты - стоимость нового станка с ЧПУ может достигать и превышать 3 миллиона рублей, а замена только системы ЧПУ – от 600 тысяч рублей. Однако эти инвестиции несут существенный риск при учете потенциального износа механической части и значительного возраста оборудования, особенно для образовательных учреждений с ограниченным бюджетом.

Актуальным направлением является модернизация существующих станков с использованием более доступных и гибких решений на базе персональных компьютеров (ПК), что позволит значительно снизить затраты на модернизацию, обеспечивая при этом функциональность, сравнимую с промышленными системами ЧПУ. Для реализации данной модернизации применяются специализированные программные пакеты с открытым исходным кодом, такие как Linux CNC, Mach3, EMC2 и другие - эти системы обеспечивают широкие возможности программирования, используя языки G-code (стандартный язык для программирования станков ЧПУ) и другие, совместимые с промышленными системами. То есть программы, разработанные для промышленных систем ЧПУ, часто могут быть адаптированы и использованы в системах на базе ПК.

Чтобы осуществить переход на управление от ПК требуется решение ряда технических задач. Ключевым элементом является CNC-контроллер – устройство, которое обеспечивает интерфейс между программным обеспечением на ПК и приводами станка. Контроллеры преобразуют цифровые сигналы от ПК в аналоговые, управляющие работой шаговых или серводвигателей, отвечающих за перемещение рабочих органов станка (шпинделя, суппортов и т.д.). Современные CNC-контроллеры поддерживают различные типы двигателей, включая высокоточные серводвигатели с обратной связью и шаговые двигатели с микрошагом. Они обеспечивают управление вспомогательными устройствами станка, такими как револьверные головки, автоматические податчики, системы охлаждения и смазки.

В рассматриваемом примере базовый станок оснащен двигателем подачи ШД-5Д1МУ3 – 12-полюсным шаговым двигателем с пассивным ротором и напряжением питания 48В. Однако многие современные контроллеры, в особенности недорогие и компактные, оптимизированы для работы с двигателями, имеющими меньшее количество полюсов (2, 4 или 6), что делает прямое подключение двигателя ШД-5Д1МУ3 к таким контроллерам невозможным. Происходит несовпадение параметров и потенциальная нестабильность работы. Соответственно, при модернизации приходится заменять базовый двигатель на совместимый аналог.

Вместо двигателя ШД-5Д1МУ3 был выбран двигатель GB23H282-30-4В (или аналогичный с соответствующими параметрами), выбор которого обусловлен несколькими факторами:

- совместимостью с используемым контроллером (необходимо убедиться в соответствии параметров двигателя и контроллера, таких как напряжение питания, ток удержания, количество полюсов и т.д.);
- доступностью на рынке, ценой и техническими характеристиками.

Двигатель GB26H282-30-4В может иметь меньшее количество полюсов (например, 4 полюса). Это упрощает управление и повышает точность позиционирования. Также, чтобы

обеспечить плавное и точное движение рабочих органов станка, необходимо учесть момент инерции двигателя

Процесс модернизации также включает в себя разработку и настройку программного обеспечения для управления станком, что подразумевает создание программы обработки (G-code) для конкретной детали, настройку параметров контроллера (шаг двигателя, частота импульсов, ускорение, скорость и т.д.) и калибровку системы - для неё часто используют специальные датчики, позволяющие точно определить положение рабочих органов станка.

Следует подчеркнуть, что для успешной модернизации станка с ЧПУ на базе ПК требуются не только технические знания и навыки, но и глубокое понимание принципов работы как механической части станка, так и системы ЧПУ. Необходимо учитывать все возможные риски и потенциальные проблемы, включая проблемы с совместимостью оборудования, настройкой программного обеспечения и обеспечением безопасности, что требует привлечения квалифицированных специалистов для выполнения работ по модернизации. Даже при использовании готовых решений, индивидуальная настройка и тестирование являются необходимыми этапами для обеспечения надежной и эффективной работы модернизированного станка. Снизить затраты на обновление производственных мощностей и вернуть в строй станки, значительно продлив срок их службы, можно благодаря правильному выбору компонентов, точной настройке и тестированию.



Рисунок 1. - Токарный станок ТПК125ВН2[1]

Модернизация электроприводов

Сначала хотели использовать двигатель от изначальной машины, который имеет 12 полюсов с пассивным ротором и напряжение 48 вольт. Но при проверки литературы было найдено, что ПЛК предназначены для управления 2-, 4- и 6-полюсными двигателями и стало понятно, использовать изначального двигателя невозможным. Сейчас используются активные мотор-редукторы, которые работают при больших оборотах при более низком напряжении

питания. Вместо базового двигателя был выбран GB26H282-30-4В с почти таким же крутящим моментом.

Определим наибольшую скорость суппорта [2], которая определяется по формуле (1):

$$V_m = t_{\text{им}} \cdot f \cdot 60, \text{ мм/мин}$$

где $t_{\text{им}}$ – перемещение привода, соответствующее 1 импульсу, мм;

f – частота подачи импульсов, Гц.

Принимаем $f = 25000; 35000; 75000; 10000$, Гц.

Перемещение привода, соответствующее 1 импульсу, определяется из формулы (1):

$$t_{\text{им}} = \theta^\circ 360^\circ \cdot i_p \cdot p \cdot t_{\text{хв}},$$

где θ° – угол поворота ротора шагового двигателя, приходящийся на один импульс, $\theta^\circ = 1,5^\circ$.

i_p – передаточное отношение редуктора гидроусилителя в приводе ходового винта;

$t_{\text{хв}}$ – шаг ходового винта, мм.

Для поперечных подач $t_{\text{хвпоп}} = 2$ мм. Для продольных $t_{\text{хвпрод}} = 4$ мм.

Передаточное отношение редуктора (2):

$$i_p = Z_1$$

$$Z_2, i_p = 15/126 = 0,119$$

(2)

Величина микрошага, настраиваемого в драйвере привода:

$$p = 1; 1/2; 1/4; 1/8; 1/16.$$

Результаты вычислений предоставлены в таблицу 1.

Таблица 1. – Зависимость скорости перемещения суппорта от частоты подаваемых сигналов и величины микрошага.

p	1		1/2	
Перемещение	поперечное	продольное	поперечное	продольное
$t_{\text{им}}$	0,00091	0,001982	0,000494	0,000991
$V_{\text{max}}, ff = 25000$	147	2975	742	1487
$V_{\text{max}}, ff = 35000$	2083,1	4166,3	1041,4	2083,1
$V_{\text{max}}, ff = 75000$	4463	8927	2229	4462
$V_{\text{max}}, ff = 100000$	5951	11902	2974	5951
p	1/4		1/8	
Перемещение	поперечное	продольное	поперечное	продольное
$t_{\text{им}}$	0,000247	0,000497	0,000121	0,000246
$V_{\text{max}}, ff = 25000$	371	741	185	371
$V_{\text{max}}, ff = 35000$	520,6	1041,4	260,2	520,6
$V_{\text{max}}, ff = 75000$	1114	2229	554	1111

$V_{max}, ff = 100000$	1489	2974	743	1486
p	1/16			
Перемещение	поперечное	продольное		
$t_{им}$	0,000246	0,000494		
$V_{max}, ff = 25000$	93	184		
$V_{max}, ff = 35000$	130,1	260,2		
$V_{max}, ff = 75000$	277	554		
$V_{max}, ff = 100000$	371	742		

Из этого расчета можно сделать вывод, что максимальная точность позиционирования достигается при наименьших значениях микрошага. Поэтому для достижения максимальной требуемой скорости перемещения суппорта необходимо принять минимальное значение. Согласно Паспорту, максимальная скорость перемещения суппорта составляет $V_{тпрод} = 180$ мм/мин; $V_{тпоп} = 90$ мм/мин, что составляет то же значение что и при величине микрошага: $p = 1/16$ и частоте подачи импульсов $f = 25000$ Гц.

Компенсация погрешности, обусловленной дрейфом нуля электропривода подачи.

Компенсация ошибок из-за дрейфа нуля в электроприводах подачи различается для открытых и закрытых электроприводов подачи.

Замкнутые электроприводы в режиме слежения характеризуются следующим изменением положения ползуна станка [3] (рис. 2).

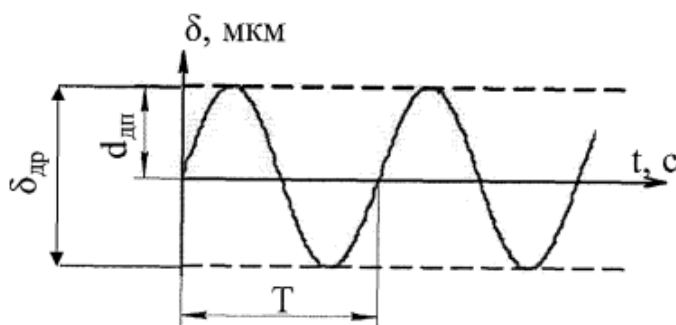


Рисунок 2. - Дрейф нуля следящего электропривода, где D - чувствительность датчика положения, δ - дрейф нуля следящего электропривода, T - период изменения дрейфа нуля следящего электропривода.

Нулевое проскальзывание электропривода происходит только в пределах точности датчика положения [5]. Ошибка положения суппорта увеличивается до тех пор, пока не будет достигнут порог чувствительности датчика. Датчик фиксирует смещение суппорта и посылает сигнал в систему ЧПУ; ЧПУ использует сигнал от датчика положения для формирования

сигнала о несоосности. Суппорт перемещается в противоположную сторону от смещения. Затем процесс компенсации повторяется.

Поэтому не требуется никаких дополнительных действий для компенсации отклонения нуля, вызванного самой системой управления фиксацией положения. Ошибка отклонения нуля замкнутого привода подачи может быть определена из следующего соотношения (3)

$$\delta_{\partial p} = d_{\partial n} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3)$$

В этом случае ошибки могут быть уменьшены за счет повышения точности датчика положения или использования системы управления цифровым приводом подачи с ненулевым скольжением.

Для электроприводов с разомкнутым контуром (например, шаговых электроприводов) характерно следование за изменением положения ползуна станка (рис. 3).

Поскольку обратная связь по положению отсутствует, ошибка из-за нулевого проскальзывания привода может быть бесконечно большой. Чтобы компенсировать эту ошибку, в системах ЧПУ предусмотрены параметры станка, которые уменьшают эту ошибку. Компенсация обычно достигается путем считывания значения ошибки с датчика положения и ее компенсации через определенный промежуток времени. Компенсация дрейфа осуществляется за счет того, что система ЧПУ подает дополнительный сигнал компенсации на привод подачи.

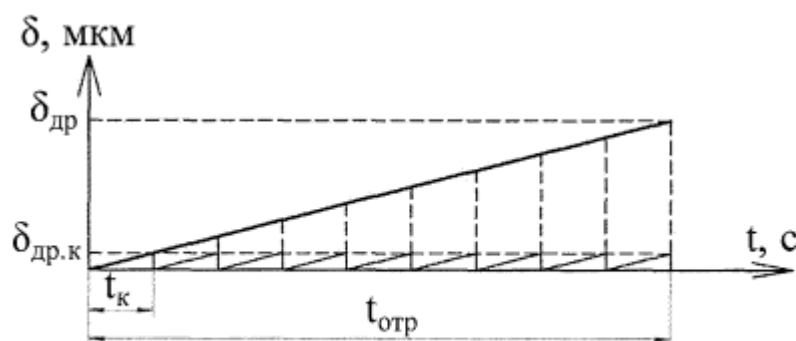


Рисунок 3. - Дрейф нуля разомкнутого электропривода.

где $\delta_{др}$ - погрешность, обусловленная дрейфом нуля разомкнутого электропривода;
 $\delta_{др.к}$ - погрешность, обусловленная дрейфом нуля разомкнутого электропривода, после компенсации; $t_{отр}$ - время отработки кругового контура детали; t_k - промежуток времени между компенсациями погрешности, обусловленной дрейфом нуля разомкнутого электропривода.

Величину погрешности после компенсации можно определить из выражения (4):

$$\delta_{\partial p.к} = \frac{\delta_{\partial p}}{t_{отр}} \cdot \Delta t_k, \quad (4)$$

где $\delta_{др}$ - величина погрешности до компенсации (определена в блоке 3 алгоритма диагностики); $\delta_{др.к}$ - величина погрешности после компенсации; Δt - промежуток времени, через который производится компенсация дрейфа нуля электропривода.

Эта формула показывает, что значение ошибки, вызванной отклонением нуля привода подачи, минимизируется в наименьший промежуток времени, в течение которого происходит компенсация отклонения нуля привода подачи. Минимальное время компенсации ошибки нулевого отклонения привода соответствует минимальному времени цикла управления приводом T_{min} . Обычно цикл управления приводом равен циклу интерполяции.

При $\Delta t = T_{min}$ выражение будет иметь вид (5)

$$\delta_{др.к} = \frac{\sigma_{др}}{t_{отпр}} \cdot T_{min}, \quad (5)$$

где T_{min} - минимальное время такта управления электроприводом.

Выводы:

1. Обоснована замена шагового двигателя в приводе подачи, определены частота подаваемого сигнала и величина микрошага двигателя. После анализа точности позиционирования ползуна в продольном и поперечном направлениях можно повысить точность позиционирования на 11 %, если включить функции компенсации люфта шестерен станка и уменьшения микрошага двигателя.
2. Повышенная точность позиционирования и уменьшенный дрейф нуля позволяют более точно контролировать положение ползуна и повысить качество обработки заготовок.

Список литературы

1. Станок патронный высокой точности с ЧПУ. Модель ТПК125ВН2. Руководство по эксплуатации 72003.020.00.000 РЭ. – М.: 1985. – 162 с
2. Расчет и конструирование металлорежущих станков: Учеб. пособие / И.И. Михеев, Е.Н. Ярмоленко – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 152 с.
3. Агафонов, В.В. Определение погрешностей обработки с учетом динамических характеристик упругой системы станка /В.В. Агафонов // СТИН. - М.: Стин, 2006, № 5. - С. 10-13.
4. Андрейчиков, Б.И. Динамическая точность систем программного управления станками / Б.И. Андрейчиков. - М.: Машиностроение, 1964. - 368 с.
5. Бесекерский, В.А. Проектирование следящих систем малой мощности / В.А. Бесекерский, В.Н. Орлов, Л.В. Полонская, С.М. Федоров. - Л.: Судпромгиз, 1958. - 168 с.
6. Ли, Х. И Ванг, Х. (2016). "Динамическая компенсация смещения нуля для сервосистем с использованием нейронной сети". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12 (3), 1155-1163. DOI: 10.1109/TII.2015.2490219.
7. Шао Л. И Чжан Х. (2018). "Новый метод компенсации смещения нуля в сервосистемах". Журнал механических наук и технологий, 32 (4), 1505-1512. DOI: 10.1007/s12206-018-0311-9.
8. Кумар, А., и Сингх, А. (2020). "Методы компенсации смещения нуля в серводвигателях: обзор". Журнал систем управления, автоматизации и электротехники, 31 (1), 1-15. DOI: 10.1007/s40313-020-00429-0.

УДК 621.7

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ ГРУППОВОЙ УПАКОВКИ ЗА СЧЕТ УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ

*А.А. Возжзов,¹
А. И. Дробитько ¹*

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация;

АННОТАЦИЯ

Автоматизация процесса сборки пакета групповой упаковки, блоков пищевой соды для дальнейшего обертывания термоусадочной пленкой, позволяет повысить производительность сборочного процесса и качество упаковки. Повысить производительность сборочных операций можно не только за счет уменьшения времени фасовки и формирования тары, но и за счет увеличения скорости перемещения приводов позиционирования захватного устройства. Проведен анализ производительности элементов автоматической линии, сделан вывод, что увеличение производительности линии возможно при увеличении скорости приводов позиционирования. С целью нахождения наилучших способов управления и определения требуемых параметров, при которых достигается необходимое быстродействие с заданной точностью проведено исследование динамики двух координатного позиционера.

Ключевые слова: групповая упаковка, манипулятор, моделирование, производительность, двухскоростное управление.

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF GROUP PACKING OPERATION BY ACCELERATING THE TRANSPORT PROCESS

*A. A. Vozhzhov,¹
A. I. Drobitchko ¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation;

ABSTRACT

Automation of the process of assembling a package of group packing, blocks of baking soda for further wrapping with shrink film, allows to increase the productivity of the assembly process and the quality of packaging. It is possible to increase the productivity of assembly operations not only by reducing the time of packing and tare formation, but also by increasing the speed of movement of the gripper positioning drives. The productivity of the automatic line elements has been analyzed and it has been concluded that the increase of the line productivity is possible by increasing the speed of positioning drives. In order to find the best ways of control and to determine the required parameters, at which the necessary speed with a given accuracy is achieved, the study of the dynamics of two-coordinate positioner is carried out.

Key words: group packing, manipulator, modeling, productivity, two-speed control.

Введение. Увеличение количества выпускаемой продукции является одним из главных факторов совершенствования производства. Одним из способов повышения является внедрение в производство автоматизированных систем. Одной из таких систем является автоматизированный комплекс фасовки сыпучих продуктов и упаковки, а транспортировка на стадии групповой упаковки выполняется двухкоординатным консольным приводом [1].

При работе автоматизированной линии определенное время уходит на перемещение упаковок между стадиями фасовки и групповой упаковки. Сокращение времени транспортировки упаковок является одним из способов повышения производительности работы линии.

Автоматизированная линия представлена на рисунке 1 и состоит из: 1) картонатор; 2) маркиратор; 3) конвейер; 4) манипулятор; 5) устройство оборачивания пленкой; 6) термотуннель; 7) вентилятор охлаждения; 8) толкатель.

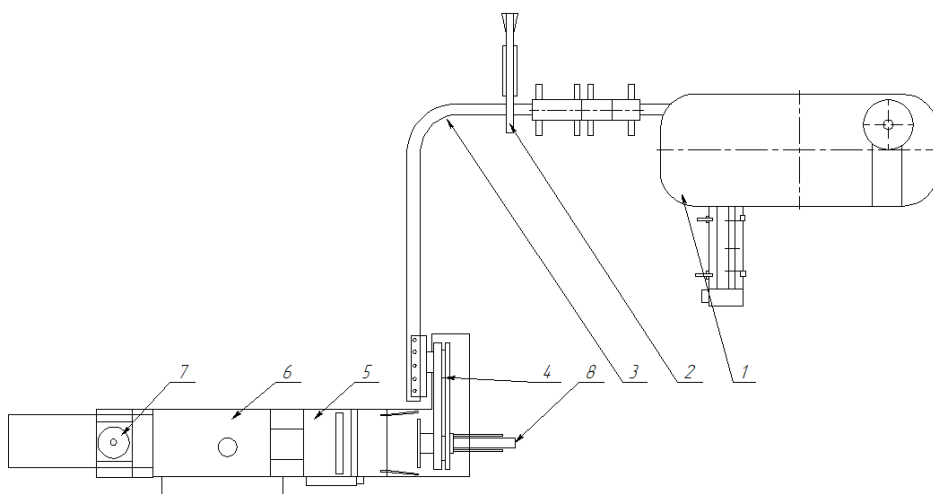


Рисунок 1. Компоновка автоматизированной линии

В ходе анализа схемы и производительности ее компонентов был обнаружен самый низкопроизводительный элемент. В этой схеме им является манипулятор и исходя из производительности других элементов был выяснен лимит повышения производительности до 40 упаковок.

Пищевая сода продолжает оставаться важнейшей пищевой добавкой, однако на этом её применение не заканчивается, она может применяться не только в приготовлении блюд, как дома, так и в различных заведениях, но и в различных бытовых целях и т. д.

Рынок пищевой соды продолжает расти, и по прогнозам он будет расти на 2.8% в год. В связи с ростом рынка будет увеличиваться производство пищевой соды, а это означает необходимость увеличения количества линий по упаковке пищевой соды или повышение производительности уже имеющихся.

Пищевая сода упаковывается в картонные коробки с весом продукции 0,5 или 1 кг, после этого производится групповая упаковка по средствам формирования блока из коробок 5 по 3 или 5 по 4 и дальнейшего обвертывание термоусадочной пленкой и ее дальнейшей усадки в термотуннеле.

Во время групповой упаковки используется двух координатный манипулятор с пневматическим цилиндром и электромеханическим приводом.

Цель исследования - повышение производительности манипулятора с применением метода двухскоростного управления, что позволит ускорить процесс транспортировки с 35 до 40 пачек в минуту.

Для достижения поставленной цели на основе анализа принято решение применить двухскоростное управление электромеханическим приводом манипулятора. Во время использования этого метода предполагается, что основная часть пути (70-80%) осуществляется на максимально возможной скорости, а далее производится переход на меньшую (ползучую) скорость на которой осуществляется позиционирование [3]. При этом обеспечивается требуемая точность позиционирования удовлетворяющая ограничениям по ускорению. Описанный выше метод применим в подъёмных механизмах (краны, лифты), а также в различных моделях технологического оборудования для сокращения времени холостого хода в устройствах позиционирования.

В рассматриваемом случае электромеханическая система манипулятора *YXCL 2* состоит из двух модулей перемещения (Рис.2): модуль координаты X – Линейный модуль перемещения [2, 4]; модуль координаты Z - Пневматический линейный модуль. Управление происходит при помощи частотного преобразователя [3, 5].

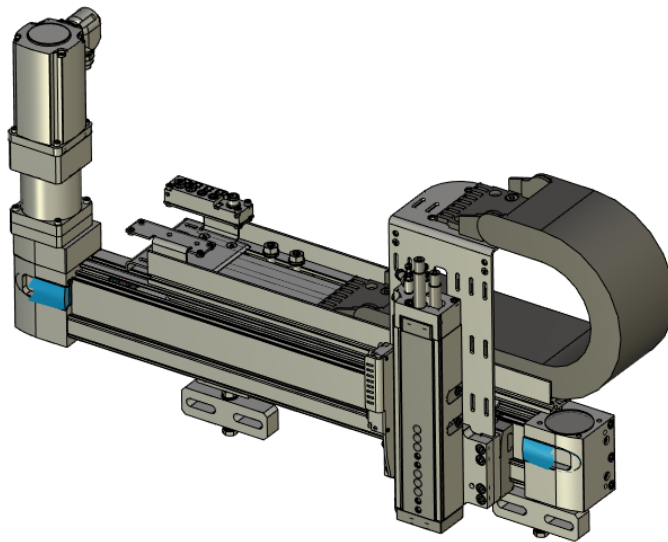


Рисунок 2. Манипулятор *YXCL 2*

Моделирование процесса с двухскоростным управлением для привода координаты Y приведено в источниках [1, 6].

Структурная схема для рассматриваемого случая разомкнутой электро механической переменной тока представлена на рисунке 3.

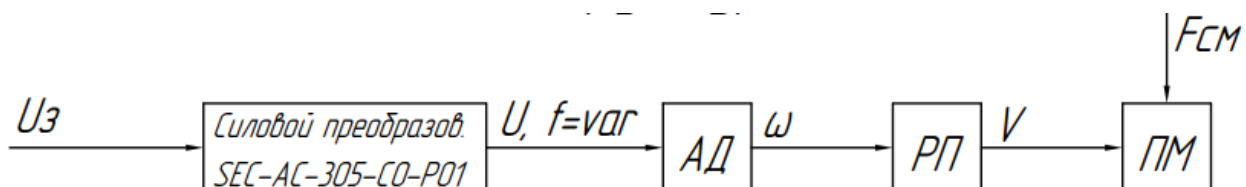


Рисунок 3 – Структурная схема электромеханической системы

где U_c – задающее напряжение; АД – сервопривод; ω – частота вращения вала двигателя; РП – ременная передача; V – скорость перемещения каретки модуля; ПМ – производственный механизм.

Моделирование разомкнутой электро механической системы переменного тока с двухскоростным управлением осуществляется по алгоритму [1].

Динамика электро механической системы переменного тока может быть представлена в виде уравнения (1).

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1)$$

где M – активный момент сервопривода; J и M_c – приведенные значения момента инерции и момента сопротивления.

Активный момент сервопривода может быть описан формулой Клосса (2):

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S_{кр}}{S_n} + \frac{S_n}{S_{кр}}}, \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – максимальный момент; S_n и $S_{кр}$ – номинальное и критическое скольжение.

Значение S определяется по формуле (3)

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (3)$$

где ω_0 – синхронная частота находится по формуле (4):

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (4)$$

где p – число пар полюсов двигателя; f_1 – частота питания статорных обмоток.

Для интегрирования уравнения движения запишем его в виде (5):

$$d\omega = \frac{M - M_c}{J} dt, \quad (5)$$

Для повышения быстродействия необходимо уменьшать время транспортирования пачки, для этого исследуется динамика приводов двухкоординатного привода, например привода поперечных перемещений.

Динамика вала двигателя переменного тока привода координаты Y описывается дифференциальным уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{2M_{кр}}{\frac{S_{кр}}{S_n} + \frac{S_n}{S_{кр}}} - M, \quad (6)$$

Его решение для рассматриваемого случая выполнено в среде MathCAD 15 [7, 8].

Для манипулятора YXCL 2 используемого на производстве произведены реальные расчеты, для этого созданы таблицы с данными и полученные следующие динамические характеристики (Рисунок 6, 7, 8). Таблица 1 – 2.

Целью расчета являлось нахождение значений параметров $F1$ и X (где $F1$ – частота при которой привод проходит основной участок пути, а X – расстояние до точки $Y_{зад}$ на которой привод переходит на частоту $F2$).

Для демонстрации результатов построим графики функций $tn = f(F1)$ и $tn = f(X)$ соответственно.

Для построения первого графика $tn = f(F1)$ необходимо произвести моделирование и занести полученные данные в таблицу 1.

Ограничение по погрешности не более 2 мм.

Исходные данные: $Y=340$ мм, $F2=25$ Гц, $X=0,08$ м.

Таблица 1. Данные параметра tn при изменении частоты $F1$

№	$F1, \text{Гц}$	$tn, \text{с}$	$\delta, \text{м}$
1	30	3,5	2.124×10^{-4}
2	40	2,9	6.145×10^{-4}
3	50	2,65	9.877×10^{-4}
4	60	2,63	0.001
5	70	2,6	0.001
6	80	2,65	0.007
7	90	2,70	0.028

График зависимости времени перемещения от частоты $tn = f(F1)$ представлен на (Рисунке 4). Из графика $tn = f(F1)$ (Рисунок 4) следует что минимальное значение tn при $F1=70$ Гц, при этом погрешность позиционирования находится в допустимом пределе, поэтому принимаем значение $F1 = 70$ Гц.

Для построения графика функции $tn = f(X)$ проведем моделирование, полученные данные занесены в таблицу 2.

Ограничение по погрешности не более 2 мм.

Исходные данные: $Y=340$ мм, $F2=25$ Гц, $F1=70$ Гц.

Таблица 2. Данные параметра tn при изменении X (точки перехода на ползучую скорость)

№	$X, \text{м}$	$F1, \text{Гц}$	$F2, \text{Гц}$	$tn, \text{с}$	$\delta, \text{м}$
1	0,05	70	25	2,3	0,067
2	0,06	70	25	2,4	0,045
3	0,08	70	25	2,55	0,005
4	0,1	70	25	2,6	0,003

5	0.11	70	25	2,6	0.001
6	0,12	70	25	2,66	2.152×10^{-4}

График зависимости времени перемещения от величины X , представлен на рисунке 5.

Из графика $tn = f(X)$ (Рисунок 5) следует что минимальное значение tn при $X=0,05$ м, но при этом допуск по погрешности превышен, поэтому по совокупности двух параметров (tn и δ) принимаем значение $X = 0,11$ м.

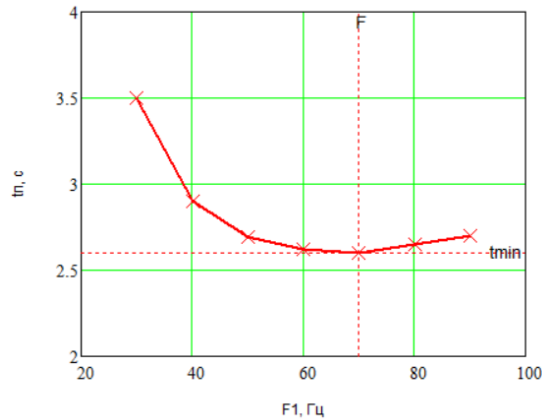


Рисунок 4. График длительности переходного процесса с изменением частоты на основном участке

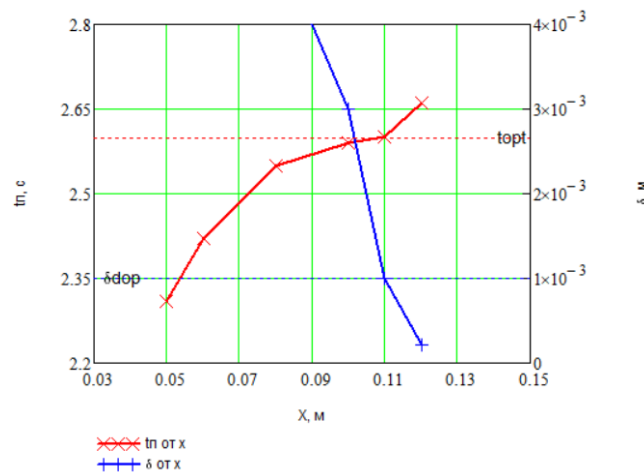


Рисунок 5. График длительности переходного процесса и погрешности позиционирования в зависимости от длины участка с ползучей скоростью

В процессе моделирования были построены графики динамических характеристик:

График зависимости ускорения от времени (Рисунок 5) из которого видно, что максимальное ускорение достигается в момент торможения.

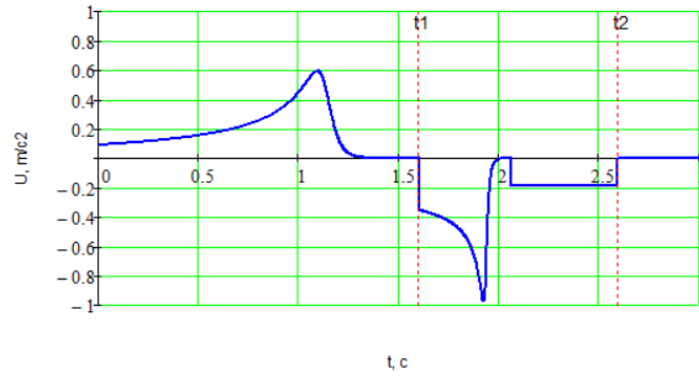


Рисунок 6. График зависимости ускорения во времени

График зависимости скорости от времени (Рисунок 7) из которого видно, что максимальная скорость основного участка равняется 0,282 м/с. После 1,6 с привод переходит на ползучую скорость, которая равняется 0.101 м/с.

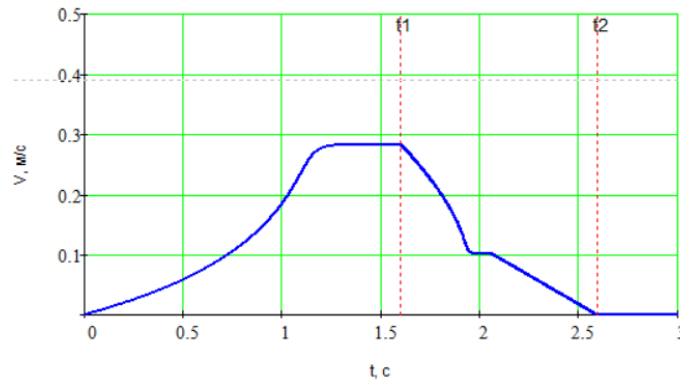


Рисунок 7. График зависимости скорости платформы во времени

График изменения координаты от времени (Рисунок 7) из которого видно, что время переходного процесса равняется 2,6 с.

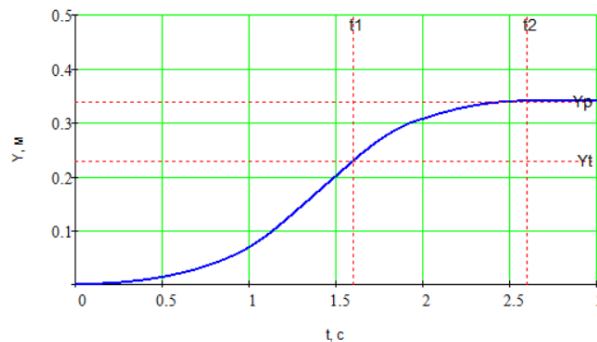


Рисунок 8. График зависимости перемещения платформы во времени

Расчет времени перемещения, при заданных параметрах перемещения линейного электромеханического модуля выполнен экспериментально:

- линейный модуль перемещения координаты Y $t = 2.6$ м/с;
- операция захвата и подъема, совместно с операцией опускания занимают $t = 2$ с.

Время, затраченное на перемещение 5 упаковок и возврат в исходное положение $t = 7.2$ с. что составляет 8.2 циклов, округляем до 8, то есть 40 упаковок в минуту. При этом производительность повышена на 14%.

Вывод: Применение метода двухскоростного управления эффективно, позволило уменьшить время выполнения приводом горизонтального перемещения упаковок с пищевыми продуктами на 14% до 40 упаковок в минуту, Что увеличило производительность автоматизированной линии в целом.

В дальнейшем, предполагается провести оптимизацию параметров позиционирования с регулированием частоты в процессе движения для достижения максимального быстродействия при ограничениях на погрешность позиционирования и максимальное ускорение.

Список литературы

1. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование механотронных модулей движения/ Е.В. Пашков, А.Н. Круговой, В.А. Крамарь, Л.Л. Беляева, В.В. Альчаков; под ред. Е.В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с., ил.
2. Device for automatic pressure regulation in a chamber with a liquid technological medium isolated from the pressure source Pashkov E.V., Polivtsev V.P., Polivtsev V.V., Vozhzhov A.A. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020. BRISTOL, ENGLAND, 2020.
3. Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А.А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. — Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. — 121 [1] с
4. Сайт Linear gantry YXCL: [электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.festo.com/de/en/p/linear-gantry-id_YXCL/?q=%7E%3AsortByCoreRangeAndNewProduct
5. Сайт Servo drive CMMT-AS/CMMT-ST & servo motor EMMT-AS: [электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.festo.com/us/en/e/solutions/electric-automation/servo-drive-cmmt-as-cmmt-st-and-servo-motor-emmt-as-id_406501/
6. Воронин П.А Системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода: методические указания по курсу «Системы управления электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. - 51 с.
7. Усольцев А.А., Лукичев Д.В., Ловлин С.Ю., Никитина М.В., Поляков Н.А., МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ – СПб: Университет ИТМО, 2023, – 74 с.
8. Новиковский Е. А. Учебное пособие «Работа в системе MathCAD 15» / Е. А. Новиковский. – Барнаул: Типография АлтГТУ, 2013. – 114 с.

УДК 621.9-113

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОКАРНО-РЕВОЛЬВЕРНОГО СТАНКА 1А616 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ ПРОВЕДЕНИЯ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Э. Р. Ваниев¹,
А. В. Васильев¹,
К. С. Капаев¹,

(¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия)

Аннотация. В статье приведены результаты инженерного модального анализа модернизированного токарно-револьверного станка 1А616 в универсальной программной системе Ansys, в которых отражены формы колебаний несущей системы при пяти различных частотах, позволяющие оценить увеличение жесткости всей системы.

Ключевые слова: Токарно-револьверный станок, модальный анализ, метод конечных элементов Ansys, жесткость несущей системы.

MODERNIZATION OF THE TURNING REVOLVER MACHINE 1A616 TO INCREASE THE RIGIDITY OF THE SUPPORTING SYSTEM BY CONDUCTING MODAL ANALYSIS

E. R. Vaniev¹,
A. V. Vasiliev¹,
K. S. Kapaev¹,

(¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia)

Annotation. The article presents the results of engineering modal analysis of the modernized turret lathe 1A616 in the universal software system Ansys, which reflects the vibration modes of the supporting system at five different frequencies, allowing to estimate the increase in rigidity of the entire system.

Keywords: Turning revolver machine, modal analysis, Ansys finite element method, load-bearing system rigidity.

Введение. Для обработки большого спектра деталей типа тела вращения в подавляющем большинстве используют токарно-револьверный станок. Отличительной особенностью конструкции является наличие дополнительного модуля, который способен нести разные инструменты для целого ряда технологических операций (точения, сверления, зенкерования, а также фрезерование при использовании приводного инструмента). Этим модулем является многопозиционная (обычно от 6 до 24 позиций) поворотная головка, способная менять инструмент необходимый на данной операции. В дополнение ко всему, эти устройства оснащаются системой ЧПУ. Данные станки применяют в тех случаях, когда в технологическом процессе заложена смена рабочих инструментов.

Современные токарно-револьверные станки обладают высокой точностью и гибкостью, их используют для изготовления деталей средними партиями.

Повышение точности обработки достигается несколькими способами, среди которых распространены как увеличение точности в электронной части, так и в механической.

В первом случае используются новые датчики, N-кодеры уже встроены в двигатель, так называемые серводвигатели, имеющие обратную связь, которые, как и асинхронные двигатели позволяют точно задавать скорость и угол поворота. Помимо электроприводов используются пневмо- и гидроприводы, в которых быстродействие гораздо выше. Эти элементы позволяют использовать адаптивные системы управления, которые могут уже в момент обработки регулировать параметры резания, повышая точность.

Во втором случае, для поддержания высокой точности, нужна высокая жесткость как несущей системы станка (НСС), так и отдельных ее частей.

Для поддержания жесткости движущихся частей пытаются сократить их количество, т.е. упростить кинематические цепи, для этого вместо того, чтобы использовать механическую передачу для перемещения рабочих органов, как это делалось в станках предыдущего поколения, используют несколько самостоятельных поводков подач.

Для повышения жесткости в НСС станины, колонны, тумбы и т.д., изготавливают с утолщенными стенками и дополнительными ребрами жесткости. В настоящее время нужно учитывать и тепловые деформации НСС, чтобы обеспечить равномерное температурное деление во всех элементах станка.

Для расширения технологических возможностей токарно-револьверные станки оснащают дополнительными координатами – оси, относительно которых происходят движения рабочих органов станка.

Благодаря современным системам ЧПУ, которые взаимодействуют с датчиками и приводами, возможен контроль всех систем станка, что позволяет компенсировать погрешности, вызываемые внешним воздействием [1].

Проведенный анализ современных токарно-револьверных станков показал, что модернизация путем расширения технологических возможностей оборудования, увеличения точности и производительности является актуальным.

Цель статьи – проведение модального анализа несущей системы модернизированного токарно-револьверного станка 1А616 в универсальной программной системе Ansys.

Основная часть. При рассмотрении преимуществ токарно-револьверных станков для токарного станка 1А616, в качестве модернизации для увеличения производительности устанавливается револьверная головка и задняя бабка с пневмоприводом, для расширения технологических возможностей прилагаются координаты С и Y, а также устанавливается новый привод.

Инженерный модальный анализ несущей системы станка выполняется в Ansys. Для этого нужно создать 3D-модель в САД системе (рис. 1) и экспортировать в одном из двух форматов sat или ijs. 3D-модель создается с упрощениями для правильной работы программы.

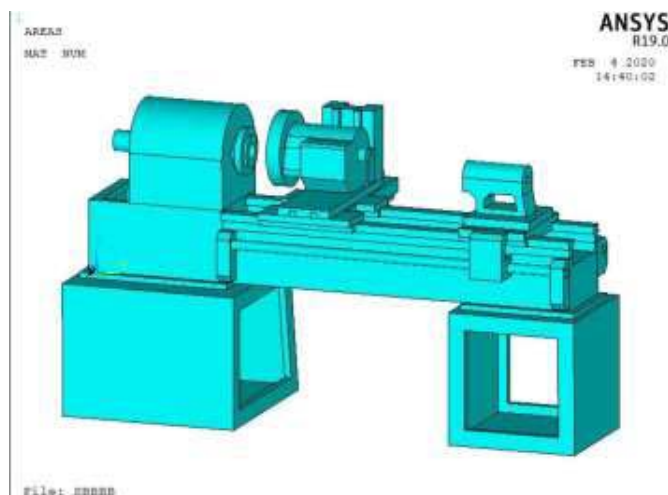


Рисунок 1 – Общий вид станка

В несущую систему станка входит станина, передняя и задняя бабка, передняя и задняя тумба, револьверная головка, направляющие, продольные и поперечные суппорты.

Любая физическая система может возмущаться. Собственные частоты и формы колебаний, которые принимает вибрирующая система, могут быть определены аналитически посредством проведения модального анализа.

Анализ вибраций – немаловажная часть проекта для любой конструкции. В НСС основным фактором вибраций является процесс резания. В процессе проведения модального анализа определяются частоты и формы колебаний. Это дает возможность определить необходимость внесения конструктивных изменений и соотнести с режимом эксплуатации, в частности скоростью резания.

Модальными параметрами, характеризующими вибрацию, являются:

- собственные частоты;
- модальное демпфирование;
- формы колебаний.

Модальные параметры всех видов в пределах диапазона частот создают полное динамическое описание структуры. Таким образом, виды вибрации представляют внутренние динамические свойства структуры. Экспериментальное модальное тестирование представляет собой процесс обнаружения всех модальных параметров, достаточных для формулирования математической динамической модели. Модальный анализ выполняется для того, чтобы построить часть динамических характеристик рассматриваемой модели: собственные частоты (модальные частоты); формы колебаний (табл. 1). Знание этих характеристик позволяет сформировать представление о динамическом поведении модели [2].

Таблица 1 - Формы колебаний и частоты

Форма колебаний	Частоты, Гц
1 форма (рис. 2 и 3)	121
2 форма (рис. 4 и 5)	168
3 форма (рис. 6 и 7)	200
4 форма (рис. 8 и 9)	237
5 форма (рис. 3.15 и 3.16)	267

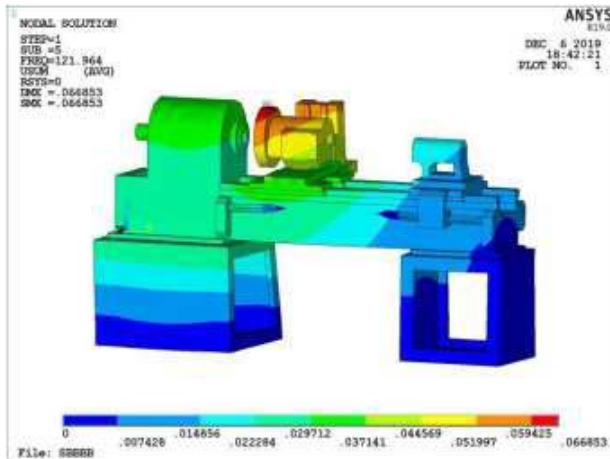


Рисунок 2- Первая форма колебаний станка на частоте 121 Гц

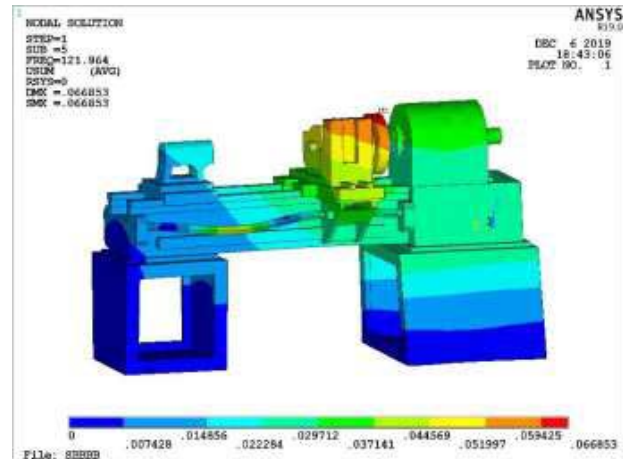


Рисунок 3 - Первая форма колебаний станка на частоте 121 Гц

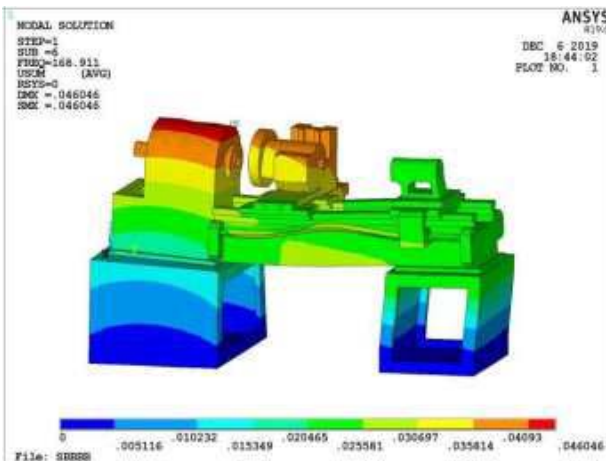


Рисунок 4 - Вторая форма колебаний станка на частоте 168 Гц

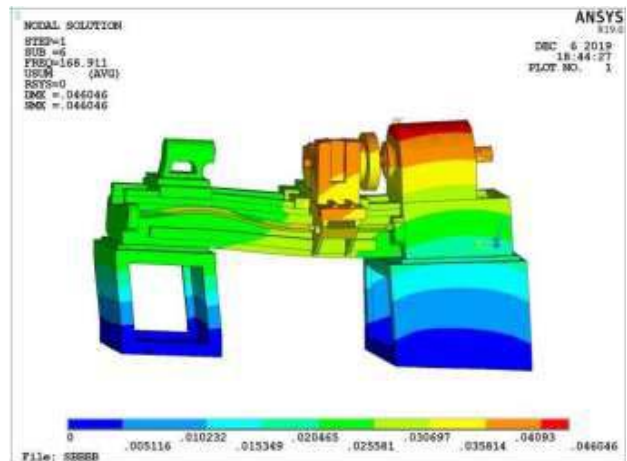


Рисунок 5 - Вторая форма колебаний станка на частоте 168 Гц

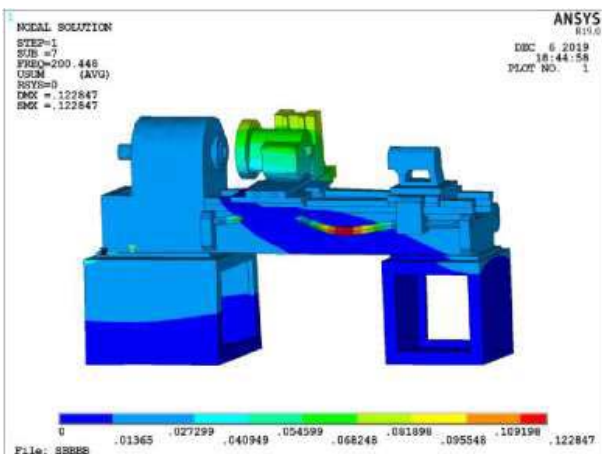


Рисунок 6 - Третья форма колебаний станка на частоте 200 Гц

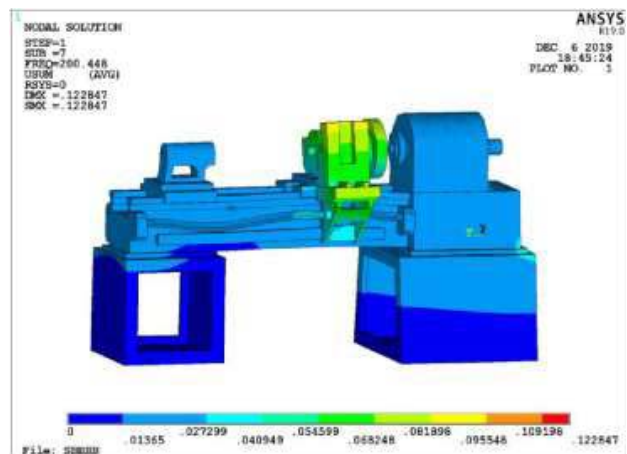


Рисунок 7 - Третья форма колебаний станка на частоте 200 Гц

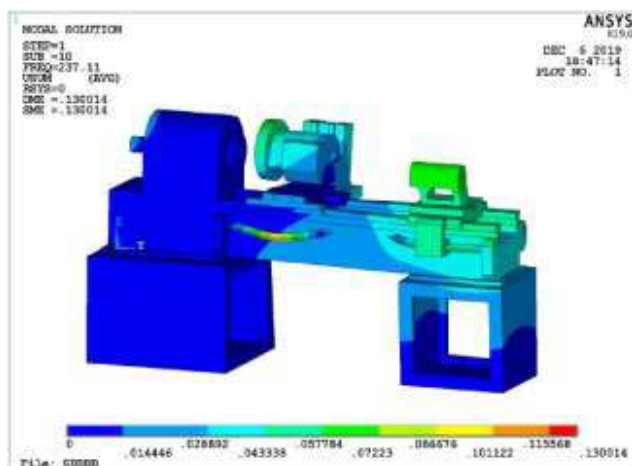


Рисунок 8 - Четвертая форма колебаний станка на частоте 237 Гц

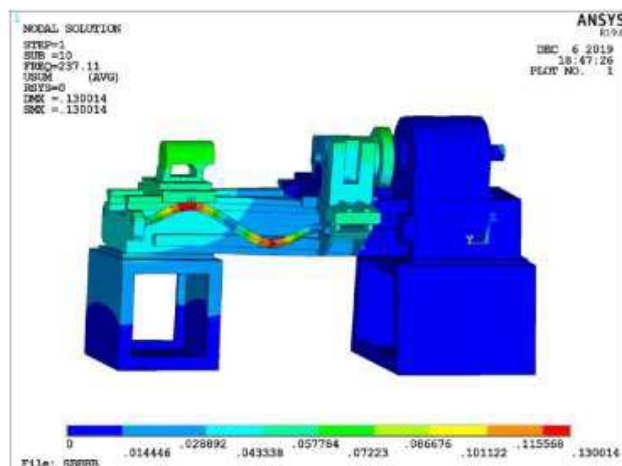


Рисунок 9 - Четвертая форма колебаний станка на частоте 237 Гц

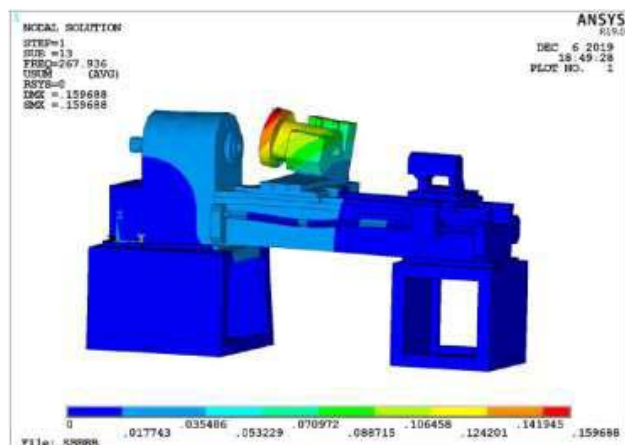


Рисунок 8 - Пятая форма колебаний станка на частоте 267 Гц

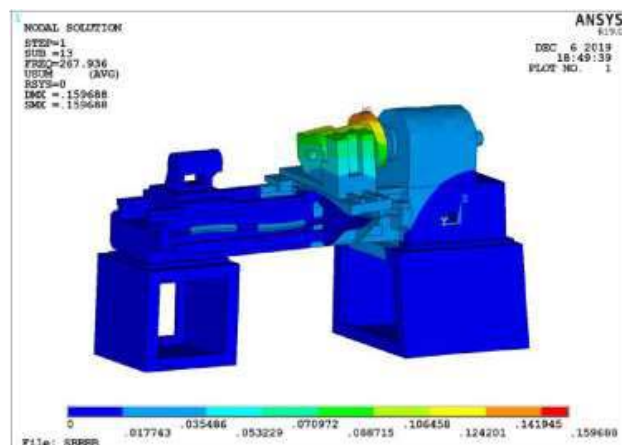


Рисунок 9 - Пятая форма колебаний станка на частоте 267 Гц

Закключение. Проведенный модальный анализ позволяет принять конструктивное решение по модернизации токарно-револьверного станка 1А616 за счет переработки несущей системы, что позволит дополнительно увеличить жесткость всей системы.

Список литературы

1. Решетов, Д. М. Детали и механизмы металлорежущих станков: в 2-х т. / Д. М. Решетов. – М. : Машиностроение, 1972.
2. Поляков, А. Н. Расчет несущих систем станков в САЕ – системе Ansys [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 151002.62 Металлообрабатывающие станки и комплексы, 151900 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств. Мехатроника и робототехника / А. Н. Поляков, С. В. Каменев, К. С. Романенко. – Оренбург : ОГУ. – 2013. – ISBN 978-5-4417-0335-2. – 190 с.
3. Вожжов А.А. Процедуры формирования параметров качества при механической обработке деталей Вожжов А.А., Ярохина Д.В. Главный механик. 2020. № 9. С. 17-23.

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПОИСКУ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ БЕССТРУЖЕЧНЫХ МЕТЧИКОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*И.В. Тищенко¹,
А.О. Харченко¹*

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия;

АННОТАЦИЯ

Существующая технология изготовления резьбового профиля на бесстружечных метчиках часто не обеспечивает требуемую стойкость инструмента и приводит к ухудшению качества обрабатываемых резьб. Для повышения эффективности и качества мелкоразмерных бесстружечных метчиков необходима разработка новых конструкций метчиков и технологического оборудования для их изготовления. Целью статьи является обоснование комплексного подхода к поиску перспективных конструкций метчиков и технологического оборудования для их производства. В ходе исследования были проанализированы основные концепции проектирования, в результате чего был предложен комплексный подход к поиску перспективных конструкций на основе комбинированной концепции проектирования. Данный подход может стать основой для методики направленного поиска перспективных конструкций мелкоразмерных бесстружечных метчиков и оборудования для их изготовления.

Ключевые слова: мелкоразмерные бесстружечные метчики, направленный поиск, поиск перспективных конструкций.

THE JUSTIFICATION OF THE COMPLEX APPROACH FOR PROMISING DESIGNS SEARCH OF SMALL-SIZED FLUTELESS TAPS AND EQUIPMENT FOR THEIR MANUFACTURING

*I.V. Tishchenko¹,
A.O. Kharchenko¹*

¹ FSAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russia;

ABSTRACT

The existing fluteless taps' thread profile manufacturing technology does not often ensure the required tool life and causes the machined threads' quality decrease. In order to increase the small-sized fluteless taps' effectiveness and quality the development new taps and manufacturing equipment designs is needed. The objective of this paper is the justification of the complex approach for search of taps and manufacturing equipment promising designs. In the study the main design concepts were analyzed. In result the complex approach for the promising design search based on the combined design concept was introduced. This approach could become the basis of the technique for target promising design search of small-sized fluteless taps and equipment for their manufacturing.

Keywords: small-sized fluteless taps, target search, promising design search.

Введение. В современном машиностроении, особенно в таких его отраслях, как приборостроение и электротехническая промышленность, более 60% выпускаемых изделий содержат резьбовые соединения. Основным методом получения внутренних резьб для них является обработка метчиками. При этом наибольшие трудности возникают при формообразовании внутренних резьб малых диаметров М2...М6 в труднообрабатываемых материалах, например, в заготовках из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, а также алюминиевых и титановых сплавов. Наиболее прогрессивным, а иногда и единственно возможным, методом получения резьбовой поверхности в алюминиевых и титановых материалах является метод пластического деформирования бесстружечными метчиками [1].

Несмотря на очевидные достоинства в виде более высокой прочности резьбы с низкой шероховатостью и большей надёжности инструмента, метод пластического деформирования для обработки внутренних мелкогабаритных резьб по-прежнему применяется недостаточно широко. Причиной является то, что существующая технология изготовления резьбового профиля на бесстружечных метчиках часто не обеспечивает требуемую стойкость инструмента и приводит к ухудшению качества обрабатываемых резьб [1]. Это свидетельствует о том, что проблема создания прогрессивной технологии и оборудования для производства мелкогабаритных бесстружечных метчиков стоит достаточно остро.

Для эффективной разработки указанного оборудования целесообразно активно использовать научно-обоснованные и объективные методы поиска технических решений. Однако применение одного или даже нескольких известных методов по отдельности недостаточно эффективно ввиду их узкой специализации. Требуется выработка методики проектирования, в основе которой будет лежать комплексный подход к поиску перспективных технических решений.

Цель исследования: обоснование комплексного подхода к поиску перспективных конструкций мелкогабаритных бесстружечных метчиков и технологического оборудования для их изготовления.

Для обоснования нового подхода необходим тщательный анализ существующих концепций проектирования, поскольку именно в процессе проектирования решается задача поиска новых технических решений.

Анализ существующих концепций проектирования

В общем виде процесс проектирования – это преобразование исходных данных (требований, ограничений, запросов) в описание объекта разработки, представляющее информацию о спроектированном изделии. Исследования в этой области показали, что проектирование является комплексным процессом и его природа до сих пор недостаточно исследована [2].

С точки зрения практического применения процесс проектирования чаще всего анализируется в контексте того, что лежит в основе решения той или иной задачи.

В рамках наиболее ранней концепции считалось, что задача проектирования решается целиком в голове проектировщика, а сам процесс является непознаваемым. Наиболее известные последователи данной концепции (А. Осборн, У. Гордон, Э. Мэтчетт, Дж Бродбент) считали, что человеческий мозг воспринимает входные данные в виде требований к изделию и выдаёт выходные данные в виде описания объекта разработки путём «озарения» под воздействием опыта, интуиции и окружающего мира [2]. В терминах теории систем такая модель называется «чёрный ящик», соответственно концепция получила название «Процесс проектирования как «чёрный ящик»» (рисунок 1).

Характерные особенности данной концепции:

1. Интуиция и опыт здесь не только управляющее воздействие, но и активное возмущающее воздействие. Считается, что предыдущий опыт мешает находить новые решения выходящие за рамки привычного.

2. Получение результата требует времени на обработку всей информации.

3. Процесс можно только пытаться направлять к «озарению», но управлять им невозможно.

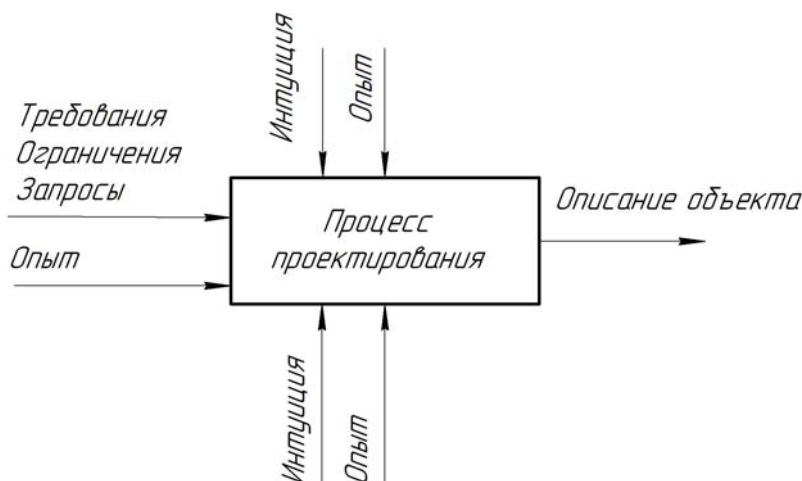


Рисунок 1. Процесс проектирования как «чёрный ящик»

Следующий этап примечателен внедрением логических процедур при разработке изделий. В новой концепции процесс проектирования рассматривается как «прозрачный ящик». Схема представлена на рисунке 2.

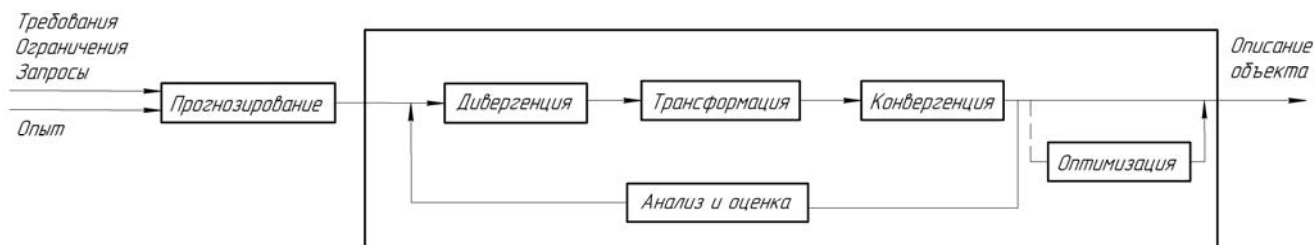


Рисунок 2. Процесс проектирования как «прозрачный ящик»

Входные данные – это те же требования к изделию и информация об условиях его работы. На основе входных данных проводятся исследования с целью определения области возможных решений и проектных критериев.

Конечное решение формируется в результате протекания процессов дивергенции, трансформации, конвергенции, анализа и оценки. В ходе дивергенции проектная задача расширяется за пределы исходных ограничений, собирается дополнительная информация для анализа проблемы. Далее на этапе трансформации происходит синтез возможных решений, которые потом отбираются на этапе конвергенции. В ходе анализа и оценки решения выявляется насколько решение удовлетворяет техническому заданию, требуется ли оптимизация. Если проектные критерии не выполняются процесс начинается заново.

Характерные особенности данной концепции:

1. Цикличность.
2. Расширение области поиска решений и работа с альтернативами.
3. Трудность перебора всех возможных решений из-за их большого количества.

Попыткой устранить недостатки подходов «прозрачного ящика» стало разделение проектирования на поиск решения и контроль стратегии поиска. Новая концепция получила название «Проектирование как самоорганизующаяся система» (рисунок 3).

Здесь выходные данные становятся дополнительным управляющим воздействием. Поиск же ведётся с помощью алгоритмов на основе эвристических методов и чаще всего заключается в устранении противоречий, которые возникли в проектной ситуации, и направлении мышления проектировщика на достижение требуемого результата.

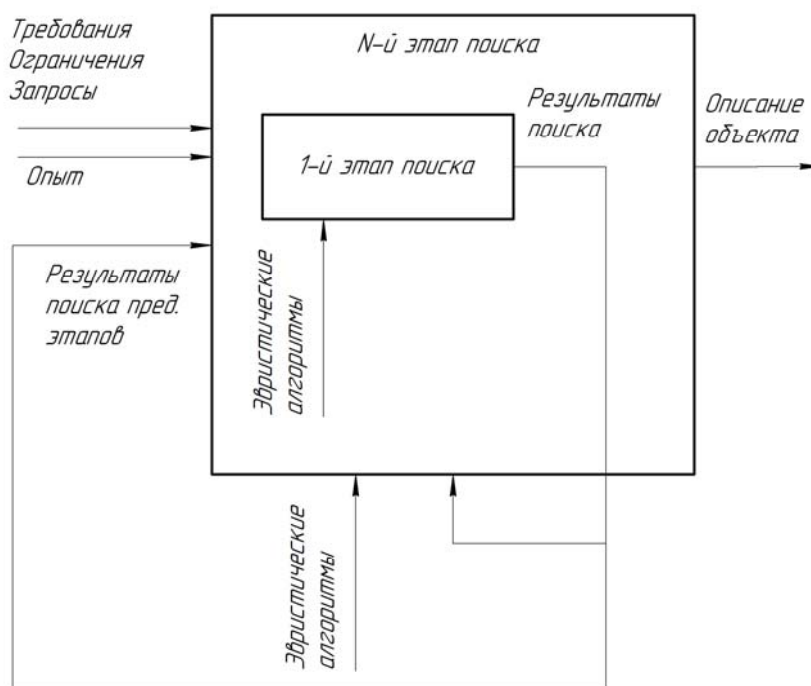


Рисунок 3. Процесс проектирования как «самоорганизующаяся система»

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика всех основных концепций проектирования.

Из сравнительного анализа следует, что ни одна концепция в чистом виде не подходит для эффективного поиска новых конструкций мелкогабаритных бесстружечных метчиков и технологического оборудования для их изготовления.

В рамках данного исследования было предложено объединить положительные стороны каждого из подходов и устранить их недостатки.

Таблица 1. Сравнительная характеристика концепций проектирования

Концепция	Положительные стороны	Недостатки
Чёрный ящик	Быстрый поиск решения для простых проблем.	1) Процесс плохо поддается управлению. 2) Ожидание «озарения». 3) Опыт – одновременно стимулирующий и ограничивающий фактор.
Прозрачный ящик	1) В основе поиска – понятные логические операции. 2) Всесторонний охват области возможных решений. 3) Получение оптимального решения.	1) Сложно проанализировать абсолютно все варианты. 2) Требуется определения конкретных критериев оценки.
Самоорганизующаяся система	1) Меньшая область поиска. 2) Опыт предыдущих этапов влияет на поиск в следующих этапах. 3) Возможность автоматизировать процедуру поиска.	1) Предполагает единственность полученного решения и не исследует альтернативы. 2) Излишняя направленность в силу алгоритмичности.

Комбинированная концепция проектирования

Схема комбинированной концепции проектирования представлена на рисунке 4.

Для синтеза новой концепции на первом этапе за основу была взята «самоорганизующаяся система» с поиском в ограниченном поле решений и корректировкой стратегии по результатам поиска. Однако присущая данному подходу установка, что алгоритм даёт единственно верное решение снижает возможность обнаружить оптимальное инновационное решение. Причина – нет самого этапа сравнения и выбора наилучшего из возможных. Отсюда следует, что необходимо усилить работу с альтернативами. Методы «прозрачного ящика», которые основаны на системном подходе, способны эффективно выработать набор альтернатив.

В результате каждую итерацию направленного поиска было решено внедрить дивергентный поиск с последующим синтезом вариантов и выбором наилучших из некоторого множества. Возможно также уточнение выбранных вариантов прежде чем использовать их как новые входные данные для следующей итерации.

После внедрение методов «прозрачного ящика» возникает проблема совершенствования самого поля поиска, без которого невозможен поиск альтернатив.

Методы «самоорганизующейся системы» работают с неструктурированным полем ограниченным проектной ситуацией. При этом не учитывается опыт как проектировщика, так и отрасли в целом. Опыт отрасли заложен только в эвристические алгоритмы. При этом по-прежнему сохраняется влияние отрицательной стороны опыта проектировщика (психологической инерции) на предпочтение одних решений другим, а значит возможность проигнорировать потенциально сильное решение также остаётся. Этот же фактор снижает ценность общего поля поиска, сформированного только из опыта проектировщика. Опыт отрасли в целом здесь будет эффективнее, но тоже требует исследования и систематизации.

Эта проблема решается другой группой методов «прозрачного ящика» – системными морфологическими исследованиями отрасли с декомпозицией признаков будущего изделия и работой с характеристиками каждого признака. Полученный массив информации останется только структурировать.

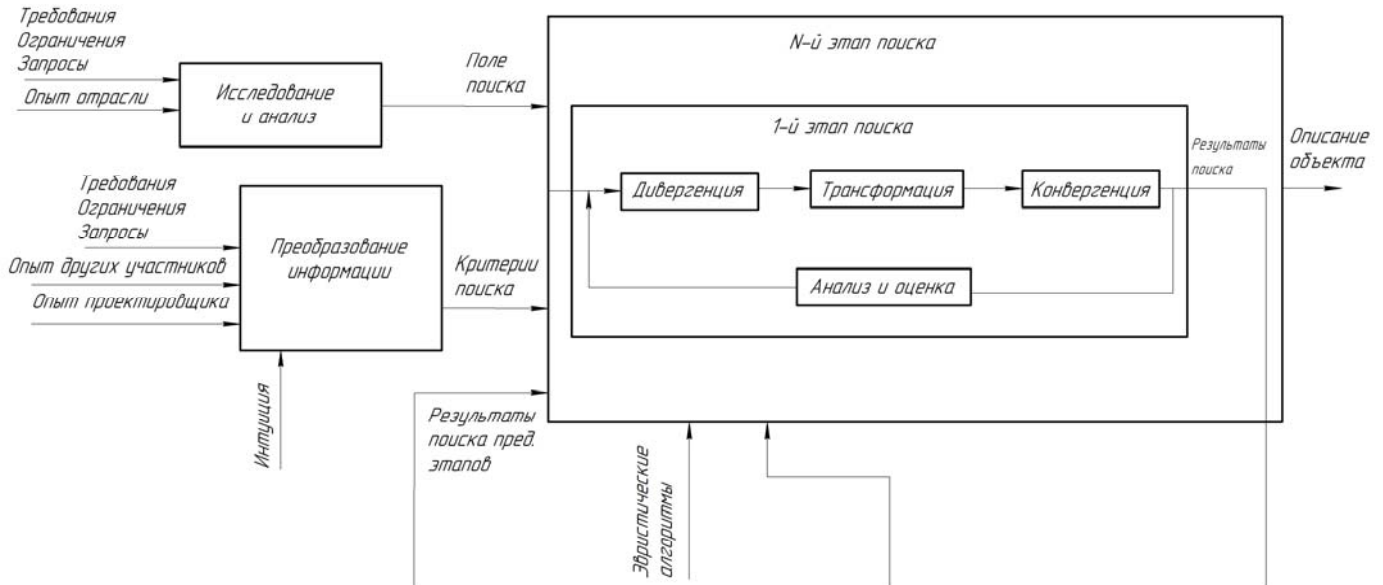


Рисунок 4. Комбинированная схема проектирования

Заключительная проблема – выработка критериев для поиска. Эвристические методы эффективно направляют поиск, но выделение какой-то области поиска возможно только на основе изначальных критериев. База для их выработки – требования, ограничения, и запросы, сформулированные в техническом задании на проектируемое изделие.

Трудностью использования ЭВМ при разработке изделия на начальных этапах является сложность формализации критериев отбора тех или иных решений [3]. Именно опыт проектировщика может сформулировать эффективные и точные критерии, которые обеспечат поиск решения. В результате творческий элемент «чёрного ящика» устранить не удастся, но в данном случае меняется область его применения. Привлечение опыта других участников процесса проектирования (другие проектировщики, заказчик, специалисты смежных областей) способно ещё больше уточнить критерии для поиска.

В качестве примера проиллюстрируем начальные этапы концепции проектирования на основе задачи синтеза оптимальной системы, состоящей в определении принципов $\hat{P}$ ее построения, множества технологических элементов $\hat{C} = \{\hat{c}_i, i = 1, \dots, n\}$ системы, множества связей $\hat{\theta}$ между элементами $\hat{C}$ и функций $\hat{q} = \{q_1, \dots, q_n\}$ таких, что обеспечивается экстремум показателей q_0 , то есть:

$$(\hat{P}, \hat{C}, \hat{\theta}, \hat{q}) = \arg \text{ext} q_0(P, C, \theta, q).$$

Для определения совокупности технологических элементов оборудования для резьбообработки $\hat{C} = \{\hat{c}_i, i = 1, \dots, n\}$, связей $\hat{\theta}$ между ними и функцией $\{\hat{q}_i, i = 1, \dots, n\}$ выполним декомпозицию оборудования на подсистемы: станок (С), приспособление-загрузочное устройство (П), инструмент (И), заготовка (З), процесс резьбообработки (рисунок 5).

Процесс резбобработки в свою очередь может быть разбит на подсистемы второго уровня: съём металла, деформация металла, а также подсистемы третьего уровня: износ зубьев, силы резания, депланация инструмента, шероховатость поверхности, геометрия резьбы, тепловые процессы.

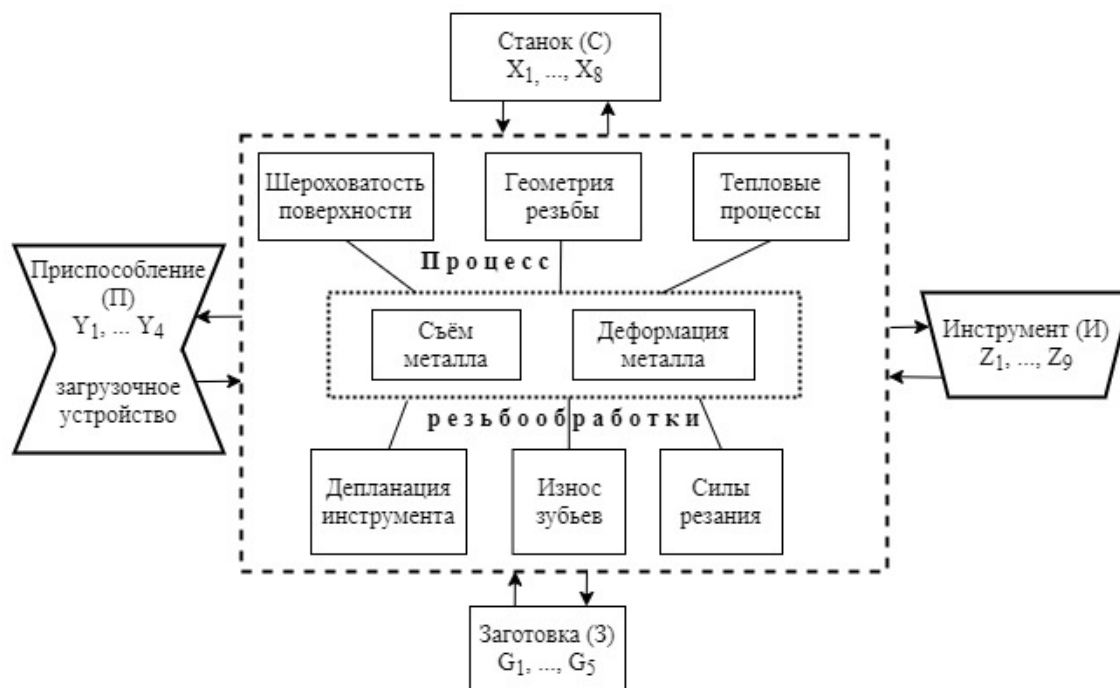


Рисунок 5. Структурная схема технологической системы резбобработки

На первом этапе решения задачи синтеза оборудования для резбонарезания при формировании множества структур будем учитывать в качестве признаков и характеристик технологических элементов их различное влияние на выходные показатели как технологических систем, так и процесса резбобработки. При этом целесообразно применить аппарат морфологического анализа. Воспользуемся построением морфологической матрицы (таблица 2).

Таким образом, морфологический анализ позволит выявить из сформированного множества несколько вышеуказанных рациональных структур инструмента. По формуле для определения комплексного критерия качества вычисляется суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Для полной информации и объективной оценки предпочтительного варианта метчика необходим учет стохастических процессов, происходящих в системе в реальных условиях функционирования [4]. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации.

Таблица 2. Морфологическая матрица подсистемы для резбообработки

Подсистема – ИНСТРУМЕНТ (И)	
1. Количество инструментов – Z ₁	1.1 Один – Z ₁₁ ; 1.2 Несколько – Z ₁₂
2. Тип инструмента – Z ₂	2.1 Метчик – Z ₂₁ ; 2.2 Бесстружечный метчик – Z ₂₂ ; 2.3 Комбинированный метчик – Z ₂₃ ;
3. Схема заборной части – Z ₃	3.1 Профильная – Z ₃₁ ; 3.2 Генераторная – Z ₃₂ ; 3.3 Прогрессивная – Z ₃₃
4. Геометрия зубьев рабочей части – Z ₄	4.1 Без затылования – Z ₄₁ ; 4.2 С затылованием: а) радиальным – Z ₄₂ ; б) осевым – Z ₄₃ ; в) пересечением резьб – Z ₄₄
5. Расположение рабочих вершин – Z ₅	5.1 Равномерное – Z ₅₁ ; 5.2 Шахматное – Z ₅₂ 5.3 Сложное – Z ₅₃
6. Количество рабочих граней – Z ₆	6.1 Три – Z ₆₁ ; 6.2 Четыре – Z ₆₂ ; 6.3 Шесть – Z ₆₃
7. Стружечные канавки – Z ₇	7.1 Прямые – Z ₇₁ ; 7.2 Винтовые – Z ₇₂ ; 7.3 Криволинейные – Z ₇₃
8. Материал рабочей части – Z ₈	8.1 Инструментальная сталь – Z ₈₁ 8.2 Быстрорежущая сталь – Z ₈₂ 8.3 Твердый сплав – Z ₈₃ 9.1 Резбовым резцом, гребенкой, головкой – Z ₉₁ ; 9.2 Резбошлифованием – Z ₉₂ ; 9.3. Резбонакатыванием роликами, плашкой, головкой – Z ₉₃ ; 9.4. Резбоштамповкой – Z ₉₄ .
9. Способ получения рабочей части – Z ₉	

Заключение. Предложенная комбинированная концепция проектирования, которая составляет основу комплексного подхода, объединяет существующие методы объективного поиска новых решений и формирует каркас единой методики. Задача этой методики – направленный поиск перспективных конструкций мелкогазмерных бесстружечных метчиков и оборудования для их изготовления. Предметом дальнейших исследований в этой области могут стать построение взаимосвязей между конкретными инструментами проектирования и проверка результативности изначально заложенных идей. В свою очередь это имеет прямое влияние на повышение качества получаемых мелкогазмерных резб в труднообрабатываемых материалах.

Список литературы

1. Харченко А. О., Харченко А. А., Владецкая Е. А. Повышение эффективности формирования резбы при изготовлении мелкогазмерных пластически деформирующих метчиков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. №5. С. 158—164.
2. Джонс Дж. К. Методы проектирования. Москва: Мир, 1986. 326 с.
3. Капустян В. М. Конструктору о конструировании. Москва: Концепт, 2008. 312 с.
4. Харченко А.О., Новоселов Ю.К., Харченко А.А. Выработка критерия эффективности при оптимизации структур станочных модулей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. №5. С. 182-186.

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.793.74, 621.763

АТМОСФЕРНОЕ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Кузьмин^{1,2},
И.П. Гуляев¹,
Д.В. Сергачёв¹,
А.С. Тамбовцев¹,
П.А. Тырышкин¹,
Б.В. Палагушкин²,
О.Ю. Лебедев²,
М.Г. Мензилова²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Институтская 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

² Сибирский Государственный Университет Водного Транспорта, Щетинкина 33,
Новосибирск, 630099, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящей статье представлены некоторые результаты работ по созданию нового поколения плазменного оборудования и технологий атмосферного воздушно-плазменного нанесения (APS) функциональных покрытий на базе разработанного и изготовленного в ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск) комплекса плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма–50». Продемонстрированы возможности напыления теплозащитных покрытий (ТЗП) с управляемой микроструктурой и существенно улучшенными характеристиками. Представлены возможности метода сверхзвукового плазменного напыления HV-APS, позволяющего заменить импортные оборудование и технологии высокоскоростного газоплазменного напыления HVOF и HVAF для нанесения плотных металлических слоёв, а также износостойких покрытий на основе карбидных керамик WC и Cr₃C₂. Так же представлена новая модификация плазмотрона «ПНК-50» для напыления на внутренние поверхности диаметром от 115 мм - плазмотрон ID-APS.

Ключевые слова: плазмотрон, функциональные покрытия, плазменное напыление, сверхзвуковой поток, турбулентный поток, ламинарный поток, термическая плазма, карбидная керамика.

ATMOSPHERIC AIR PLASMA SPRAYING OF PROTECTIVE COATINGS

V.I. Kuzmin¹,
I.P. Gulyaev¹,
D.V. Sergachev¹,
A.S. Tambovcev¹,

P.A. Tirishkin¹
B.V. Palagushkin²,
O.Yu. Lebedev²,
M.G. Menzilova²

¹ Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after. S.A. Khristianovich SB RAS, Institutskaya 4/1, Novosibirsk, 630090, Russia

² Siberian State University of Water Transport, Shchetinkina 33, Novosibirsk, 630099, Russia

ABSTRACT

This article presents some results of work on the creation of a new generation of plasma equipment and technologies for atmospheric air plasma spraying (APS) of functional coatings based on the "Thermoplasma-50" plasma spraying system developed and manufactured at the ITAM SB RAS (Novosibirsk) for powder materials. The capabilities of spraying thermal barrier coatings (TBCs) with a controlled microstructure and significantly improved characteristics have been demonstrated. The possibilities of the HV-APS supersonic plasma spraying method are presented, which allows replacing imported equipment and technologies of high-speed gas flame spraying HVOF and HVOF for spraying dense metal layers, as well as wear-resistant coatings based on carbide ceramics WC and Cr₃C₂. A new modification of the PNK-50 plasma torch the ID-APS plasma torch for spraying on internal surfaces with a diameter of 115 mm or more is also presented.

Keywords: plasma torch, functional coatings, plasma spraying, supersonic flow, turbulent flow, laminar flow, thermal plasma, carbide ceramics.

Введение. Атмосферное плазменное напыление, благодаря своим высоким энергетическим и технологическим возможностям, является одним из самых эффективных методов нанесения различных функциональных покрытий.

При плазменном напылении, как и во всех методах газотермического нанесения покрытий, частицы порошкового материала с помощью транспортирующего газа подаются в высокотемпературный газовый поток, нагреваются, ускоряются и формируют покрытие на поверхности детали.

С помощью потоков термической плазмы можно напылять практически любые порошковые материалы (керамические, металлические, металлокерамические и т.д.).

1. APS применяется для восстановления геометрии, упрочнения и защиты рабочих поверхностей деталей различных машин, механизмов и конструкций.

2. Назначения покрытий: износостойкие (истирание, эрозия, фреттинг, кавитация), коррозионная и химическая защита, тепловая защита, электроизоляция и электропроводность, антифрикционные, прирабатываемые уплотнения и т.д.

3. Широкий выбор материалов: металлы и сплавы (стали, MeCrAlY, Al, Co, Cu, Ni, Ti), оксиды (Al₂O₃, ZrO₂, SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃), карбиды (WC, Cr₃C₂, B₄C), металлокерамика и композиты и т. д.

Универсальность метода плазменного напыления, его высокая производительность, конкурентная стоимость оборудования и эксплуатации, отсутствие жёстких требований техники безопасности по работе с рабочими газами, которые в большинстве случаев не являются взрывоопасными, делает технологию плазменного напыления особенно привлекательной для широкомасштабного промышленного применения.

Особое внимание заслуживает атмосферное плазменное напыление при использовании в качестве рабочих газов обычного воздуха (воздушно-плазменное напыление). Возможность использования в качестве рабочего газа, помимо любых технически чистых газов, обычного

воздуха существенно удешевляет технологию и сокращает срок окупаемости оборудования. Необходимо отметить, что установки атмосферного плазменного напыления ведущих производителей плазменного оборудования рассчитаны на работу только с особо чистыми аргоном, азотом, водородом, гелием и их смесями.

Как в отечественных, так и в зарубежных установках плазменного напыления широко используются электродуговые плазмотроны постоянного тока. Именно этот тип плазмотронов реализует высокую концентрацию энергии в малом объёме, обеспечивает стабильность параметров плазменных потоков, а также обладает простой и удобной в эксплуатации схемой электропитания [1]. В связи с этим за базовую конструкцию взят электродуговой плазмотрон постоянного тока «ПНК-50», разработанный в ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск).

Оборудование атмосферного плазменного напыления

Полнокомплектная установка (комплекс) плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50» создана на базе плазмотрона «ПНК-50», разработанного в ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск). Схема и внешний вид плазмотрона представлены на рис. 1.

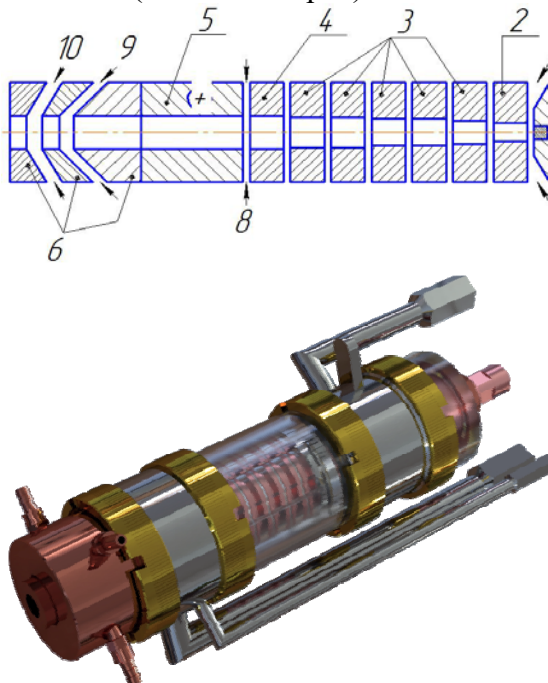


Рисунок 1. Схема и внешний вид плазмотрона «ПНК – 50»

- 1 - катод; 2 – пусковая секция;
- 3 - секции межэлектродной вставки;
- 4 - переходная секция; 5 – анод; 6 - узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой;
- 7 – плазмообразующий газ;
- 8 – защитный газ; 9 - частицы порошка с транспортирующим газом;
- 10 – фокусирующий газ

В качестве основных рабочих газов плазмотрона (плазмообразующий, защитный (завеса анода), транспортирующий и фокусирующий) используется воздух.

Небольшое количество метана, или пропан-бутана добавляется в воздух, который идёт на завесу анода плазмотрона и, при необходимости, в воздух, который используется в качестве транспортирующего и фокусирующего газов. Воздух представляет собой высокоэнтальпийный и, в то же время, наиболее доступный и дешёвый рабочий газ. Добавка метана, или пропан-бутана предотвращает окисление рабочей поверхности анода плазмотрона и напыляемых металлических порошковых материалов.

Так же в качестве рабочих газов могут использоваться аргон, азот, водород, гелий и их смеси.

Газоразрядная камера плазмотрона «ПНК-50» представляет собой расширяющийся от катода к аноду канал, набранный из электрически изолированных друг от друга и от электродов секций межэлектродной вставки (МЭВ). Межэлектродная вставка не только

фиксирует длину дугового разряда в канале плазмотрона, но и позволяет менять длину дуги, а соответственно, и рабочее напряжение за счёт варьирования количества секций МЭВ.

Существенной особенностью плазмотрона является наличие узла кольцевого ввода порошка с его газодинамической фокусировкой, обеспечивающего высокую эффективность инъекции материала в плазменную струю [2; 3].

Для получения сверхзвукового потока плазмы была разработана модификация узла кольцевого ввода порошка в виде сопла Лаваля. Таким образом, разные модификации плазмотрона «ПНК-50» позволяют генерировать ламинарный (высокоэнтальпийный), высокоскоростной (турбулентный) и сверхзвуковой потоки плазмы (рис. 2), что позволяет с высокой эффективностью напылять покрытия из порошков оксидных и карбидных керамик, различных металлов и сплавов.

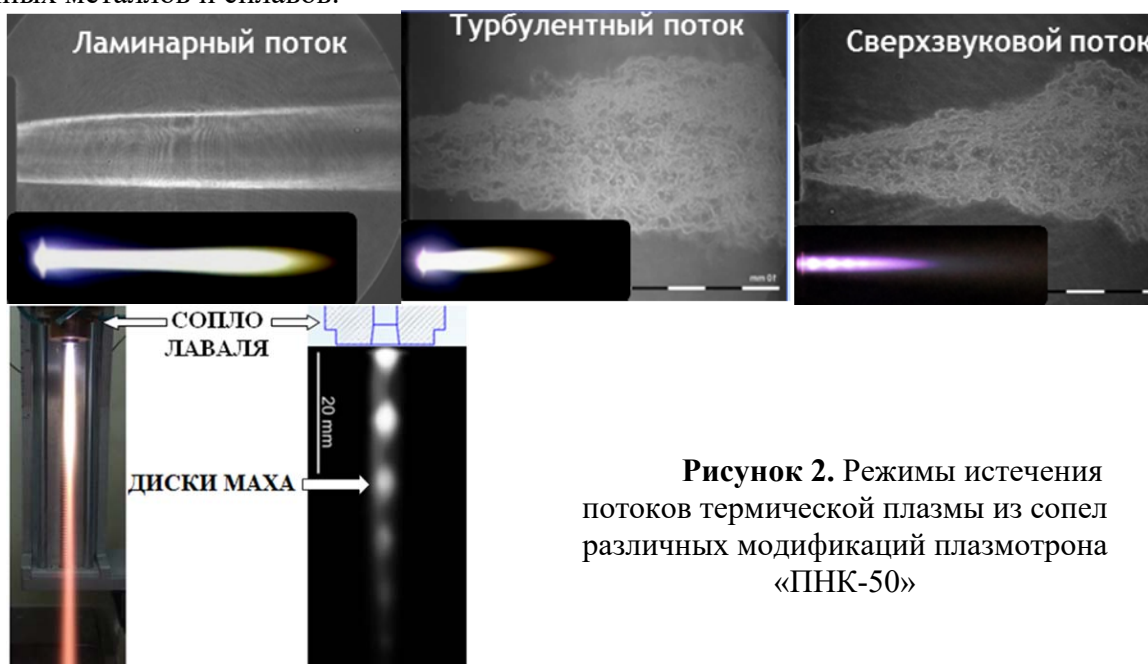


Рисунок 2. Режимы истечения потоков термической плазмы из сопел различных модификаций плазмотрона «ПНК-50»

Установка (комплекс) атмосферного плазменного напыления

Комплекс атмосферного плазменного напыления «Термоплазма 50» обладает рядом особенностей, которые выгодно отличают её от аналогов:

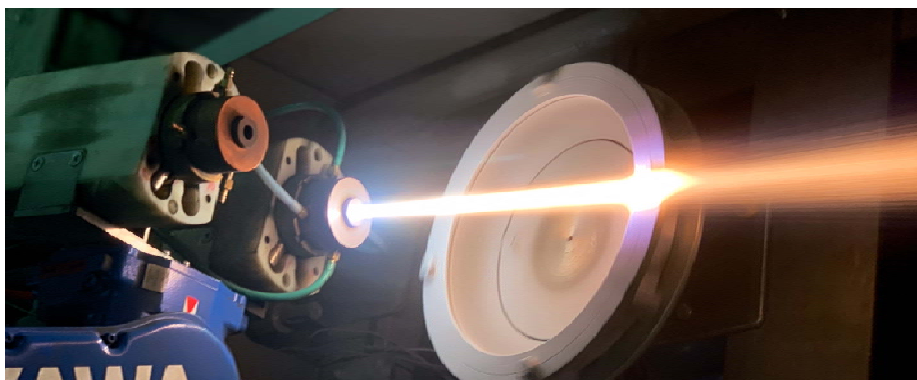
1. Использование воздуха в качестве плазмообразующего газа (экономичность);
2. Линейная схема канала плазмотрона с секционированной межэлектродной вставкой «МЭВ» (высокие стабильность дугового разряда и ресурс электродов);
3. Кольцевая инъекция порошка в канал плазмотрона (высокая производительность напыления и эффективность межфазного теплообмена);
4. Наличие сверхзвукового режима HV-APS (полная замена импортных оборудования и технологий HVOF и HVAF);
5. Плазмтроны ID-APS для нанесения покрытий на внутренние поверхности (от 115 мм).

Напылительная установка в базовом варианте оснащена двумя плазмотронами: HV-APS «Сверхзвук» – для нанесения металлического слоя, HE-APS «Керамика» – для нанесения керамического слоя (рис. 3). Переключение между плазмотронами осуществляется программно и занимает не более 30 секунд. Наличие сверхзвукового плазмотрона HV-APS [4] позволяет исключить необходимость дополнительного оснащения технологического участка

газотермических покрытий оборудованием сверхзвукового газопламенного напыления HVOF, или HVAF для нанесения металлического слоя теплозащитных покрытий (ТЗП) и износостойких покрытий на основе карбидов вольфрама WC и хрома Cr_3C_2 . Опциональный плазмотрон ID-APS может устанавливаться вместо любого из двух основных устройств.



а



б

Рисунок 3. Комплекс атмосферного плазменного напыления «Термоплазма 50» (а) и сверхзвуковая модификация плазмотрона HV-APS в работе (б)

Все плазмотроны серии «ПНК-50» основаны на схеме плазменного канала с секционированными межэлектродными вставками (МЭВ). Важным преимуществом является то, что в качестве плазмообразующего газа используется воздух — высокоэнтальпийный и доступный рабочий газ.

Как уже было отмечено выше, принципиальным элементом конструкции плазмотрона является узел кольцевой инжекции порошка в плазменный канал с его газодинамической фокусировкой, который обеспечивает ввод порошкового материала на оси потока, что способствует высокоэффективному нагреву и ускорению частиц. Ни одна из известных установок плазменного напыления, как отечественных, так и зарубежных, не оснащена подобным устройством.

Известно, что локальный точечный ввод имеет очень низкий к.п.д. использования энергии плазменной струи, который обычно не превышает 6% [5]. В то время как использование узла кольцевого ввода позволяет увеличить, по сравнению с односторонним

точечным, эффективность нагрева частиц и максимальную производительность обработки более чем на порядок [6].

Таким образом можно утверждать, что на сегодняшний день плазмотроны серии «ПНК-50» обеспечивают наилучшую, в сравнении с другими популярными серийными плазмотронами, производительность и эффективность напыления функциональных покрытий.

Теплозащитные покрытия из оксидных керамик

При использовании традиционного режима напыления HE-APS воздушный плазменный поток имеет высокую температуру 5500 – 7000 К и низкую скорость истечения из сопла плазмотрона 400 – 800 м/с (ламинарный режим работы). Такие условия эффективны для напыления тугоплавких керамик, используемых для нанесения теплозащитных покрытий. Традиционно для этих целей применяется диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (YSZ). На рис. 4 показаны примеры покрытий с различной микроструктурой, полученные из порошковых материалов YSZ. Наряду с традиционной для APS слоистой структурой с пористостью 10-15% (рис. 4 а) возможно получение покрытий с повышенной пористостью на уровне 30% и выше (рис. 4 б) для использования в качестве прирабатываемых уплотнений. Керамические покрытия большой толщины (1 мм и выше) с сегментированной структурой, образованной вертикальными трещинами с плотностью 4-5шт/мм (отмечены красными стрелками), показаны на рис. 4 в. Все представленные покрытия получены с использованием одинаковых исходных порошковых материалов, различия структур достигнуты за счет варьирования режимов напыления.

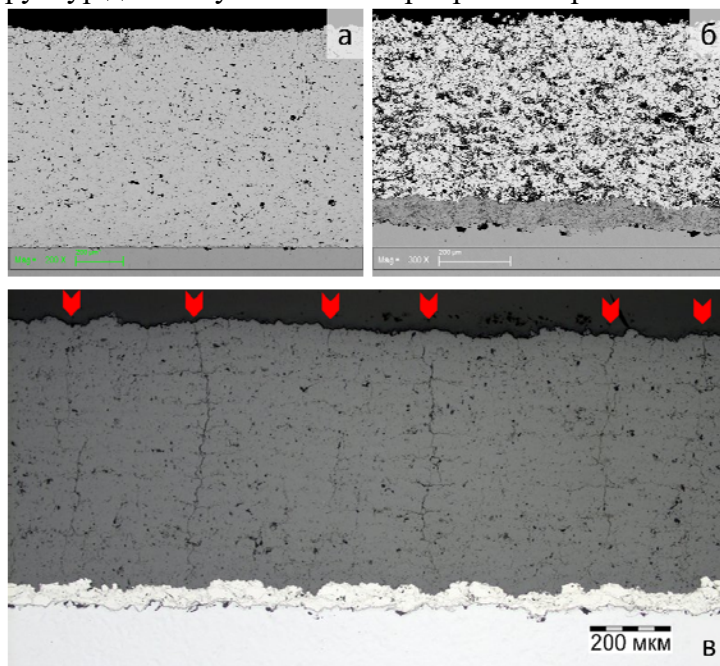


Рисунок 4. Теплозащитные покрытия YSZ с различной микроструктурой:

а - базовое покрытие с пористостью 12 %; б – покрытие с пористостью до 30%;

в – сегментированные покрытия с вертикальными трещинами DVC

К теплозащитным покрытиям нового поколения предъявляются повышенные требования по повышению рабочей температуры, снижению теплопроводности, повышению стойкости к термоциклическим нагрузкам [7]. Для решения этой задачи в ИТПМ СО РАН ведутся работы по разработке технологий нанесения керамических покрытий из новых составов. Испытания и исследования включают анализ микроструктуры, механических

характеристик керамики, жаростойкости многослойных металлокерамических покрытий, стойкость к термоудару и термоциклическим нагрузкам.

Металлический слой теплозащитных покрытий, для нанесения которого традиционно используются технология HVOF, или HVOF, во всех работах ИТПМ СО РАН формируется плазмотронами HV-APS. Сниженная температура плазмы и сверхзвуковая скорость её истечения [8] позволяют наносить покрытия NiCoCrAlY высокого качества.

На традиционных порошковых составах, а также новых системах обеспечивается плотная структура покрытий с пористостью менее 2% (рис. 5 а). Сравнительные испытания покрытий на жаростойкость по ГОСТ 6130 (рис. 5 б) и термоциклическую стойкость по ISO 13123 подтвердили преимущество систем, нанесенных с помощью воздушно-плазменного метода HV-APS (воздух)/APS (воздух), над системами, нанесенными методами HVOF (керосин)/APS (Ar/H₂).

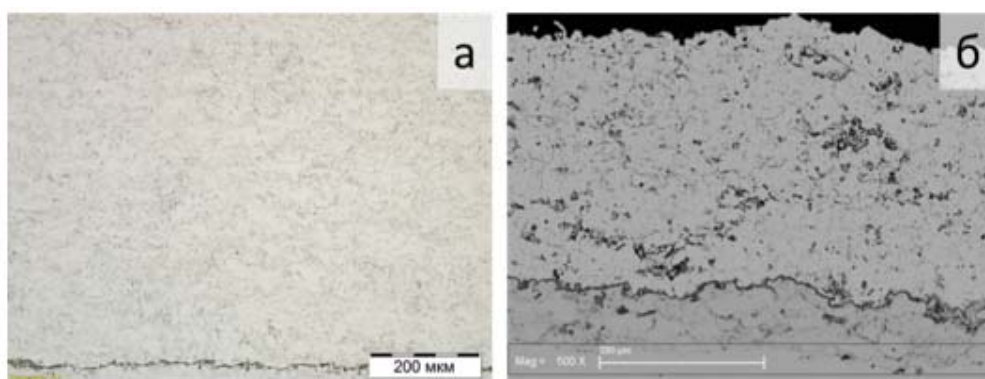


Рисунок 5. Микроструктура металлического покрытия, нанесенного методом HV-APS и двухслойного покрытия «металл-керамика»:

- а – снимок оптического микроскопа после нанесения металлического покрытия;
- б – двухслойное покрытие после испытаний на жаростойкость при температуре 1100 °С на базе 850 ч

Износостойкие покрытия на основе карбидных керамик

Покрытия на основе карбидов вольфрама WC и хрома Cr₃C₂ в настоящее время имеют лучшие показатели износостойкости и позволяют на порядок повысить ресурс деталей. Для снижения хрупкости покрытия наносят в виде металлокерамических композитов с содержанием металлической связки в количестве 8-20 % вес. В качестве металлической матрицы традиционно применяют металлы и сплавы на основе Ni, Co, Cr, например: WC/10Co4Cr или Cr₃C₂/20NiCr. Покрытия на основе карбида вольфрама имеют более высокие механические характеристики (твёрдость, стойкость к абразивному, кавитационному, эрозионному износу и т.д.), однако ограничены рабочей температурой на уровне 600 °С. Покрытия на основе карбида хрома имеют более низкие износостойкие характеристики (примерно 20-30%), однако работают до температур 850-900 °С, что позволяет их применять для защиты рабочих поверхностей деталей, работающих при высоких температурах.

Метод HV-APS позволяет наносить карбидные износостойкие покрытия с характеристиками, превышающими типичные значения технологий HVOF и HVOF. На рис. 6. показаны микроструктуры покрытий WC/10Co4Cr и Cr₃C₂/20NiCr, нанесенных в сверхзвуковом режиме плазменного напыления, а в таблице 1 – их характеристики.

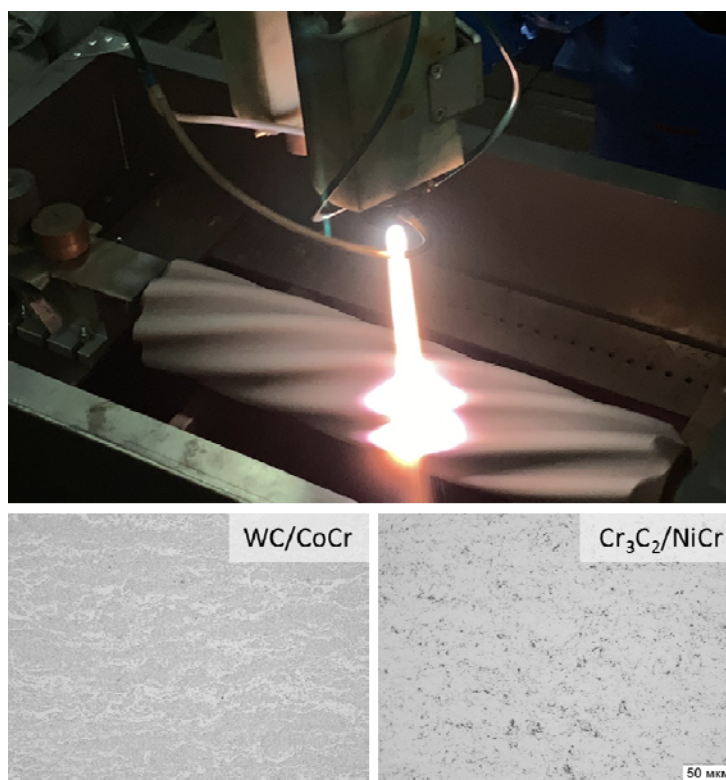


Рисунок 6. Износостойкие покрытия WC/10Co4Cr и Cr₃C₂/20NiCr, полученные методом сверхзвукового напыления

Все опробованные режимы сверхзвукового воздушно-плазменного напыления продемонстрировали микротвёрдость и адгезию на изгибе на уровне HVOF или превосходящем его [9].

Таблица 1. Характеристики карбидных покрытий, нанесённых HV-APS

Параметр	WC/10Co4Cr	Cr ₃ C ₂ /20NiCr
Пористость, %	менее 0.5	менее 2
Микротвердость, HV _{0.3}	1300±50	1000
Адгезионная прочность, МПа	более 90	более 80
Шероховатость Ra, мкм	3.0-3.5	3.0-3.5
Производительность, кг/час	до 20	до 15

Испытания износостойкости в условиях сухого абразивного трения по стандарту ASTM G65-04, выполненные для ряда покрытий, имеющих различные значения микротвёрдости, показали, что покрытие из карбидной керамики на основе WC в разы превосходит износостойкость покрытий из других металлов и сплавов (рис. 7).

Представленные результаты подтверждают перспективность широкого использования покрытий из карбидной керамики, нанесённых сверхзвуковыми потоками термической плазмы.

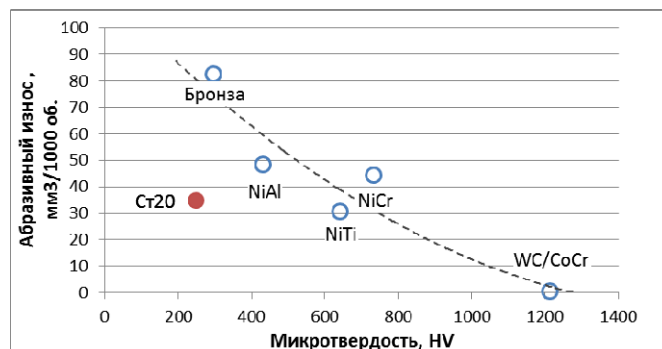


Рисунок 7. Зависимость величины абразивного износа от микротвёрдости покрытий (сухое абразивное трение по стандарту ASTM G65-04)

Нанесение функциональных покрытий на внутренние поверхности модификацией плазмотрона ПНК-ID

Важной задачей газотермического напыления, вызывающей затруднения с точки зрения технической реализации, является нанесение покрытий на внутренние поверхности, имеющие малые размеры и большие протяженности.

С этой целью для плазмотрона серии «ПНК-50» были разработаны модификации ПНК-90 и ПНК-ID (рис. 8). Плазмотрон ПНК-90 сохраняет все особенности ПНК-HE и ПНК-HV, но при этом имеет более компактный корпус, а также выводы кабель-шлангов и газовых трубок под углом 90°. Эти особенности позволяют наносить покрытия внутри изделий диаметром от 350 мм. Плазмотрон ПНК-ID имеет модифицированное сопло, поворачивающее поток плазмы на угол 60°. При дистанции напыления 40-60 мм появляется возможность нанесения покрытий на внутренние поверхности диаметром от 115 мм. Сопло оснащено сменными насадками для напыления металлических и керамических порошковых материалов.

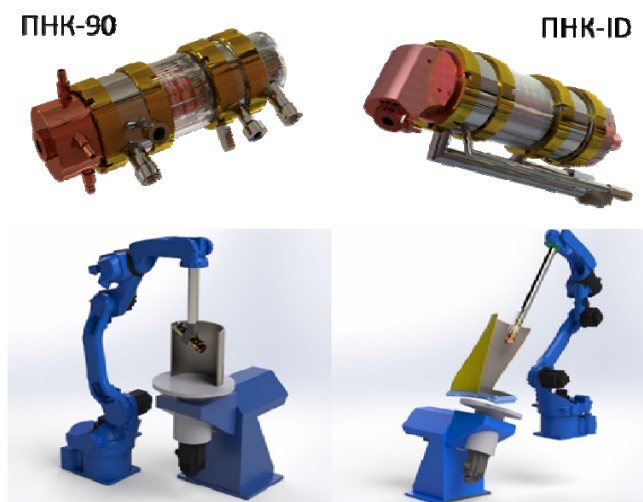


Рисунок 8. Модификации плазмотронов серии «ПНК-50»: ПНК-90 и ПНК-ID (сверху) и сценарии их применения (снизу)

Выводы. Представлено новое поколение плазменного оборудования [10] и технологии атмосферного воздушно-плазменного напыления с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа.

Напылительные устройства модификаций ПНК-HE и ПНК-HV обладают широкими диапазонами скоростей и температур плазменных потоков, что позволяет наносить

теплозащитные, прирабатываемые и износостойкие покрытия практически из любых материалов.

Реализованы технологии нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий различной микроструктуры: традиционные, прирабатываемые с пористостью до 30%, сегментированные с системой вертикальных трещин DVC.

Разработаны технологии нанесения теплозащитных покрытий из новых составов, имеющих теплопроводность ниже традиционной керамики YSZ.

Плазмотрон сверхзвуковой модификации ПНК-HV позволяет наносить износостойкие покрытия из карбидных керамик с характеристиками на уровне лучших мировых результатов.

Модульная конструкция плазмотрона ПНК-ID позволяет, путем установки поворотного сопла, осуществлять нанесение покрытий на внутренние поверхности диаметром от 115 мм.

Работа выполнена в соответствии с заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121030500145-0 и АААА-А19-119051590004-5).

Список литературы

1. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Машиностроение, Ленинград. отд., 1979. - 220 с.
2. В.И. Кузьмин, А.А. Михальченко, Е.В. Картаев. Узел кольцевого ввода порошковых материалов электродугового плазмотрона. Патент РФ №2474983. БИМП №4, 10.02.2013 г.
3. Kuzmin V.I., Mikhal'chenko A.A., Kovalev O.B., Kartaev E.V., Rudenskaya N.A. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials // J. of Thermal Spray Technology, 2012, V. 21, No. 1, p.159-168.
4. E. Kornienko et al. Microstructure and properties of Ni-Al coatings obtained by conventional and high-velocity atmospheric plasma spraying//Results in Surfaces and Interfaces 6 (2022), 100038.
5. Клубникин В.С. Электротермические плазменные устройства и процессы напыления порошковых материалов. Докт. дис. техн. наук. ЛПИ им. М.И. Калинина. – Ленинград. – 1985. – 447 с.
6. О.П. Солоненко, А.Л. Сорокин. Межфазный обмен теплом в условиях радиально-кольцевой инжекции дисперсного материала в поток плазмы//Известия СО АН СССР, серия техн. наук. Вып.5.Новосибирск: «Наука», сибирское отделение, 1990, 75-82.
7. 4. E. Bakan, R. Vaßen. Ceramic Top Coats of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Materials, Processes, and Properties/ Journal of Thermal Spray Technology 26 (2017), p. 992.
8. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., и др. Визуализация газодинамической структуры плазменных потоков напылительного плазмотрона "ПНК-50" теньевым методом// Вестник Югорского государственного университета 51 (2018) С. 61-68.
9. G. Bolelli, L. Lusvardi, M. Barletta. HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on Al alloy: Effect of the coating thickness on the tribological properties// Wear 267 (2009), pp. 944–953.
10. Кузьмин В.И. и др. Установка плазменного напыления покрытий. Патент на изобретение 2753844 С1, 24.08.2021.

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 664.95:612.396.11

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛИСАХАРИДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗ НЕКОТОРЫХ ГИДРОБИОНТОВ ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА

Ю.О. Веляев¹,
Н.И. Покинтелица¹,
О.В. Светличная¹,
В.Г. Еременко¹.

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия.

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании приводятся данные по изучению возможности получения полисахаридной фракции путём мягкого гидролиза обрезков красной водоросли *Phyllophora crispa*, которые образуются в следствии особенностей культивации данного вида гидробионта. Описаны условия процесса экстракции полисахаридной фракции, а также приводятся данные исследований выделенного опытного образца методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа и ИК-спектроскопии, который по своим параметрам является весьма близким к стандартному агароиду.

Ключевые слова: полисахариды, агар-агар, агароид, филлофора, гидробионты.

THE STUDY OF THE POSSIBILITY OF ISOLATING THE POLYSACCHARIDE COMPONENT FROM SOME HYDROBIONTS OF THE BLACK SEA BASIN

Yu.O. Velyaev¹,
N.I. Pokintelitsa¹,
O.V. Svetlichnaya¹,
V.G. Eremenko¹.

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia.

ABSTRACT

This study provides data on the study of the possibility of obtaining a polysaccharide fraction by gentle hydrolysis of scraps of the red algae *Phyllophora crispa*, which are formed as a result of the peculiarities of cultivation of this type of hydrobiont. The conditions of the extraction process of the polysaccharide fraction are described, as well as data from studies of the isolated prototype using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray analysis and IR-spectroscopy, which in its parameters is very close to the standard agaroid..

Keywords: polysaccharides, agar-agar, agaroid, phyllophora, hydrobionts.

Введение. В современном мире активно изучаются и разрабатываются технологии производства агара из морских гидробионтов [1-4]. Возможно получение агара на основе отходов от культивации красных водорослей черноморского бассейна, и использование его в производстве кулинарных изделий с использованием нетрадиционных пищевых, но нутриетивнозначимых ингредиентов. Актуальность работы состоит в том, что в настоящее время целесообразно развивать и поддерживать производство России, в частности Крыма, используя агар для кулинарных изделий, которые наряду с привлекательным видом, качественно выраженными вкусовыми и ароматическими свойствами должны иметь зачастую специальное значение – оказывать положительное воздействие на организм, как целостную систему, а так же иметь узконаправленные и специализированные свойства, например стимулирование работы щитовидной железы благодаря высокому содержанию йода, так же он отлично подойдет вегетарианцам, а так же данный ингредиент – изделие подразумевают повышенное содержания в них физиологически значимых для человека биологически активных соединений, которые предотвращают или восполняют, имеющийся в организме человека дефицит питательных веществ, сохраняют и улучшают здоровье.

Также интерес к этому полисахариду обусловлен, прежде всего, его способностью повышать вязкость и образовывать гели в водных растворах, что обеспечивает его широкое применение в пищевой промышленности, а это перспективное направление, которое интенсивно развивается.

Предметом исследования является получение агара на основе отходов от культивации красных водорослей Черноморского бассейна и изучение некоторых его физико-химических свойств. Применение научно обоснованного ресурсосберегающего подхода к переработке запасов *Phyllophora* в Черном море обеспечивает их рациональную эксплуатацию и получение четырёх типов агара (агар пищевой, микро- и бактериологический агар, агароза) и двух дополнительных видов продуктов из отходов от переработки филлофоры (пищевые волокна и кормовой белковый гидролизат). Внедрение в промышленную переработку красных водорослей *Phyllophora* и реализация её комплексной переработки позволит осуществить выпуск новых продуктов и создать условия для участия в процессе импортозамещения в России.

В последние два десятилетия российский рынок потребителей агара практически полностью зависит от его импорта вследствие остановки агаровых предприятий, ранее действовавших на Дальнем Востоке, и отсутствия новых, оснащённых современным высокопроизводительным оборудованием для крупномасштабного производства этого полисахарида. В настоящее время в связи с удорожанием важных для жизнедеятельности и здоровья человека ввозимых товаров и угрозой прекращения их поставок целесообразным является импортозамещение некоторых их групп на отечественные, в том числе агара пищевого, агарозы и особенно микробиологического агара. Решение проблемы путём разработки технологии комплексной переработки Черноморской филлофоры и выпуска агаров различных типов в конечном счёте создаст благоприятную обстановку для развития и роста отечественной агаровой промышленности.

Производство агара из филлофоры сопряжено с некоторыми негативными факторами: большими расходами водных и энергетических ресурсов, использованием химических реагентов и образованием большого количества отходов водорослей, что приводит к загрязнению окружающей среды, увеличению затрат на очистку сточных вод, повышению себестоимости конечного продукта и, как следствие, к нерациональному использованию ценных биологических ресурсов. При этом проблемы с очисткой сточных вод могут быть решены благодаря использованию современных сорбентов для их очистки, получаемых на основе отечественного природного минерального сырья [5-8]. Запасы красных водорослей

Phyllophora в Черном море невелики и требуют особо бережного подхода к их сбору и переработке. В настоящее время активный промысел филлофоры в Черном море запрещён, но сбор её из штормовых выбросов неограничен.

Образцы исследуемого гидробионта были предоставлены микропредприятием ООО "Союз Консалт", занимающимся его культивацией в рамках развития коллаборации с Политехническим институтом СевГУ. Разрушение нативной структуры гидробионта проводили путём замачивания, предварительно измельчённых обрезков водоросли в водном растворе с pH 2,5 полученном с путём добавления 0,1М HCl, при соотношении Ж:Т = 20:1 соответственно, и при интенсивном и постоянном перемешивании выдерживали в течение 2 ч при температуре смеси 40°C. После чего обрезки водоросли отделяли с помощью фильтрации от жидкой фазы и промывали дистиллированной водой до установления pH=7. Затем проводили экстрагирование водой при гидромодуле 1:30, соответственно, с добавлением раствора соляной кислоты до создания pH=6, причем экстрагирование осуществляли при температуре 100°C в течение 3 ч также при постоянном перемешивании полученной пульпы. После фильтрации экстракт очищали, путем замораживания при температуре -18°C. Замороженную массу выдерживали в течение 24 часов с последующим размораживанием и удалением талой воды. Оставшуюся массу обезвоживали путём сушки в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 50°C. Полученную массу измельчали в ступке до получения порошка.

Морфология поверхности полученного агароида и контрольного образца (агар-агара, производства ООО "Айдиго") изучалась с помощью растрового электронного микроскопа Phenom ProX при ускоряющем напряжении 5 кВ. Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ с помощью микроскопа Phenom ProX. Работы проводились в ЦКП «Перспективные технологии и материалы» ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет".

ИК-спектроскопическое исследование полученного агароида проводилось с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек», Россия) в области 4000–400 см⁻¹ (спектральное разрешение 2 см⁻¹; 16 сканов). ИК-спектр снимали в таблетке KBr. Для работы с ИК-спектрометром ФСМ-2201 использовали программу FSpec 4.3.0.7 (ООО «Инфраспек», Россия). Исследования проводились в Политехническом институте ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Навеска образца составляла 200 мкг.

Данные рентгеноэлементного анализа полученного образца представлены на рисунке 1. Хорошо видно, что выделенная фракция представлена полисахаридной фракцией, состоящей из атомов углерода и кислорода. Атомы углерода и серы, по-видимому, свидетельствуют о наличии на поверхности изучаемого объекта некоторой части аминокислот, которые могли мигрировать в продукт в процессе экстракции при разложении белка, который также содержится в исходном гидробионте, наравне с липидами, состав которых мы также в будущем планируем исследовать по отработанным методикам [11,12].

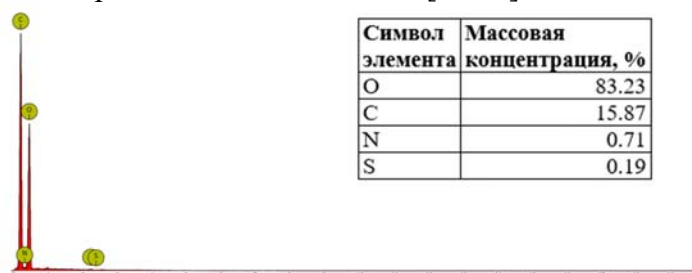


Рисунок 1. Данные рентгеноэлементного анализа полученного образца.

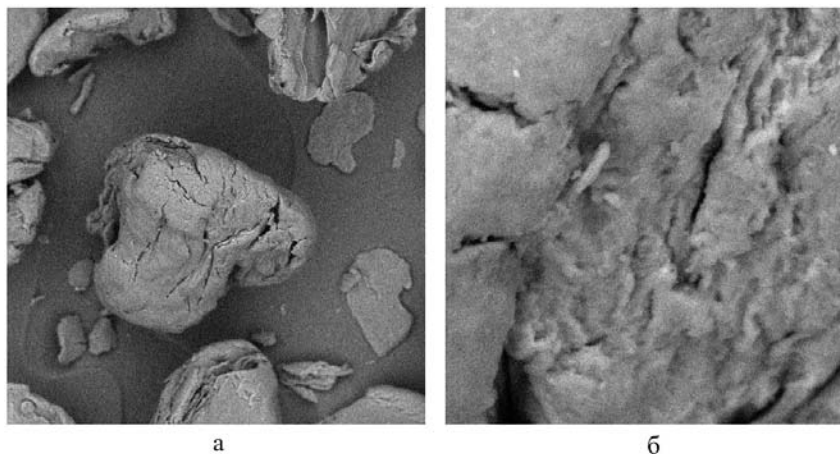


Рисунок 2. Микрофотографии полученного образца, снятые с увеличением, раз: а – 1000, б – 10000.

Микрофотографии полученного образца (рисунок 2) дают представление о том, что он представлен бесформенными агломератами размером в несколько десятков микрон, имеющими относительную правильную и слегка ламеливидную поверхность. Создаётся впечатление, что данные объекты формируются из более мелких пластин, которые возможно представлены экстрагированными из исходного гидробионта полисахаридными макромолекулами, взаимодействующими друг с другом, как-минимум через электростатические поверхностные силы, а возможно и с образованием донорно-акцепторных связей. О наличии же тех или иных химических связей возможно судить по полученному и представленному на рисунке 3 ИК-спектру.

Как и следовало ожидать одним из самых интенсивных пиков являются колебания гидроксильной группы, пик которой наблюдаются на 3465 см^{-1} , при этом сам пик достаточно широкий и характерен для валентных колебаний $-\text{OH}$ группы. Два пика 2923 и 2851 см^{-1} относятся к валентным колебаниям $\text{C}_{\text{sp}3}-\text{H}$ колебаний. Небольшой пик, находящийся в районе 2360 см^{-1} безусловно является следствием поглощения электромагнитных волн углекислым газом воздуха [8] и не относится к исследуемому веществу. Наличие данного пика не говорит об загрязнённости исследуемого вещества, а является следствием особенностей технической стороны эксплуатации прибора. Поглощение, обусловленное пиком 1634 см^{-1} , объясняется либо наличием аминокрупп белков, о возможности наличия которых мы писали ранее, либо присутствием межслоевой воды (колебания $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ связи), а возможно и аккумулируется ввиду присутствия обоих факторов [14]. Пики 1468 и 1401 см^{-1} могут принадлежать деформационным колебаниям группы атомов $\text{C}_{\text{sp}3}-\text{H}$, которых в данном объекте исследований достаточно много. Так же в этой области колебаний могут частично накладываться валентные колебания $\text{C}_{\text{sp}3}-\text{C}_{\text{sp}3}$ группы атомов. В области колебаний 1080 см^{-1} могут давать отклик гидроксогруппы, входящие в состав полисахаридов, а колебания в области 932 см^{-1} могут относиться к деформационным колебаниям концевых углеводным альдогрупп. Колебания в области 527 см^{-1} могут говорить о наличии в данном образце йода, который находится в данном объекте в форме неорганических ионов и комплексных органоминеральных соединений.

Таким образом нами была показана возможность выделения полисахаридной фракции, напоминающей по своему виду и некоторым физико-химическим свойствам агароид из обрезков красной водоросли Черноморского бассейна методом кислотного извлечения. Были изучены некоторые физико-химические свойства полученного продукта, для чего использовались методы растровой электронной микроскопии и ИК-спектрометрические

исследования. Данные исследования показали, что образец, полученный из красных водорослей Черноморского бассейна содержит, по всей видимости, помимо углеводов, также и белковую составляющую, что может положительно сказываться на конечной пищевой ценности изделий, полученных с его применением. ИК-спектроскопия показала наличие характерных для углеводно-белковых продуктов химических связей в полученном объекте.

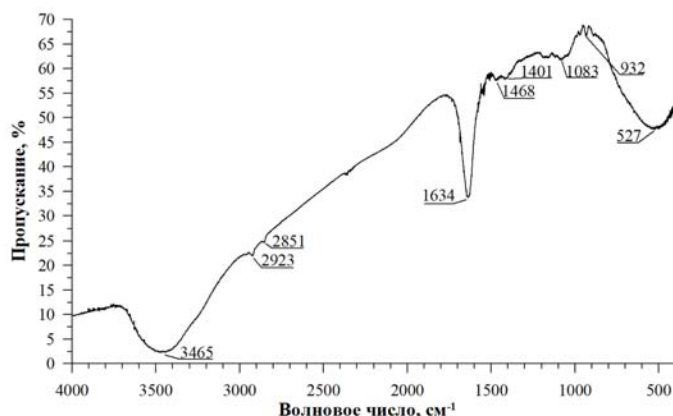


Рисунок 3. ИК-спектр экспериментального образца.

В дальнейшем нами будут изучены желирующие свойства данного экстракта и опробованы при создании кондитерских изделий на его основе.

Список литературы

1. Nunes R., Ferreira-Santos P., Moreira C., Teixeira J.A., Rocha C.M.R. Tuning the extraction methodology targeting protein-enriched fractions from red algae / *Future Foods* (2024), V9, 100335;
2. Henríquez A., Vargas J.P., Landahur C., Corrales N., Agurto-Muñoz A., González P.A., Agurto-Muñoz C. Antiviral activity of red algae phycocolloids against herpes simplex virus type 2 in vitro / *Biotechnology Reports* (2023), V38, e00798;
3. Ural G.N., Topuz O.K., Kaya A., Alp A.C., Yersüren S. Algae-based hydrogel beads: A mini-review / *Food and Humanity* (2024), V3, 100453;
4. Chen Y., Hong J., Jiang Z., Wu L., Wang X., Zhu Y., Jiang Z., Ni H., Zheng M. Effect of red algae powder on gel properties and in vitro hypolipidemic activity of fish balls / *Algal Research* (2023), V74, 103223;
5. Майоров Д.В., Веляев Ю.О. Структурно-поверхностные и сорбционные свойства диоксида кремния, получаемого из нефелинсодержащего сырья // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2022. – Т. 22 (5). – С. 725-736, EDN: EQQWZE;
6. Майоров Д.В., Веляев Ю.О. О возможности использования диоксида кремния, получаемого из минерального сырья, в качестве энтеросорбента // *Химическая технология*. – 2023. – Т. 24 (3). – С. 85-92, EDN: JSYCSI;
7. Веляев Ю.О., Майоров Д.В., Кометиани И.Б. Структурные и кислотно-основные свойства алюмокремниевых соединений, полученных кислотной переработкой нефелина // *Физика и химия стекла*. – 2022. – Т. 48 (5). – С. 597-606, EDN: GFWXUC;
8. Maiorov D., Yakovlev K., Velyaev Y. Effect of surface tension of intrapore fluid on physicochemical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ // *Materials Science Forum*. – 2022. – Т. 1052. – P. 68-73, EDN: NEOATR;

