

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

ISSN:2618-8201

№ 3 (39)
2025

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

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

«Севастопольский государственный университет»

№ 3(39)

2025

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2025

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

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2025 г. №3 (39)

*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 Возжзов 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); Суслов 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: 20.12.2025 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>Левченко Е.А., Колесов А.Г., Светличная О.В.</i> Процессы теплопередачи и теплообмена при абразивной разрезке отрезным кругом.....	4
<i>Карлов А.Г.</i> Современные проблемы и опыт формирования навыков нетривиального парадоксального мышления при подготовке инженерных кадров.....	10
<i>Круговой А.Н.</i> Автоматизированная система нанесения двухкомпонентных покрытий....	20
<i>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Федонина С.О.</i> Интеграция волнового деформационного упрочнения в аддитивный синтез на основе WAAM-технологии.....	24
<i>Репинский Б.А., Тараховский А.Ю.</i> Оптимизация многоцветной и комбинированной печати с использованием AMS.....	33
<i>Покинтелица Н.И., Братан М.И., Графова А.Е., Юрьев Д.А.</i> Анализ исследований по прецизионной разрезке слитков на пластины дисками с внутренней режущей кромкой...	39

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Гавриш В.М., Шагова Ю.О., Паничкин Т.А.</i> К вопросу модификации полиэтилена наночастицами вольфрамсодержащих соединений.....	46
<i>Гордеева Э.С., Богуцкий В.Б.</i> Оценка технологии получения заготовок из порошковых материалов для мелкомодульных зубчатых колес.....	52

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Нестеренко О. В.</i> Разработка функционального десерта «чизкейк Крымская сказка».....	58
---	----

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.7

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ ОТРЕЗНЫМ КРУГОМ

*Е.А. Левченко¹,
А.Г. Колесов¹,
О.В. Светличная¹*

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Абразивная резка является одним из самых высокотемпературных и высокоскоростных процессов резания металлов. Главной особенностью теплового процесса при абразивной резке является весьма малое время действия теплового источника большой мощности. Так время действия единичного абразивного зерна на разрезаемую поверхность составляет 10^{-5} - 10^{-6} с. Учитывая, что такой короткий промежуток времени происходит нагрев до нескольких сот, иногда более тысячи градусов, скорости нагрева достигают величин 10^5 - 10^8 град/с. Затем за счет теплопроводности металла изделия происходит отвод тепла вглубь со скоростями примерно такого порядка, как скорости нагрева.

В результате такого высокоскоростного теплового процесса происходит весьма неравномерный прогрев поверхностного слоя, температурное поле затухает на очень малой глубине и, таким образом, создается высокий температурный градиент. Указанная особенность теплового процесса не дает возможности при исследовании тепловых явлений при абразивной резке ограничиться изучением только температуры и температурного поля в поверхностном слое детали.

Возникает необходимость в изучении скоростей нагрева и охлаждения зоны резания, т.е. рассмотрения тепловых явлений в поверхностном слое детали как задач кинетики теплового процесса.

Ключевые слова: тепловой поток, качество обработанной поверхности, абразивная резка.

HEAT TRANSFER AND HEAT EXCHANGE PROCESSES IN ABRASIVE CUTTING WITH A CUTTING WHEEL

*E.A. Levchenko¹,
A.G. Kolesov¹,
O.V. Svetlichnaya¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

Abrasive cutting is one of the highest-temperature and highest-speed metal cutting processes. The key characteristic of the thermal process during abrasive cutting is the extremely short time the

high-power heat source is in action. The time a single abrasive grain acts on the cut surface is 10-5 to 10-6 seconds. Considering that heating to several hundred, sometimes over a thousand, degrees occurs in such a short time, heating rates reach 10-10 degrees/s. Then, due to the thermal conductivity of the metal, heat is transferred deeper into the workpiece at rates approximately equal to the heating rate.

As a result of this high-speed thermal process, highly uneven heating of the surface layer occurs; the temperature field attenuates at a very shallow depth, thus creating a high temperature gradient. This characteristic of the thermal process makes it impossible to limit the study of thermal phenomena during abrasive cutting to examining only the temperature and temperature field in the surface layer of the workpiece. There is a need to study the rates of heating and cooling of the cutting zone, i.e. to consider thermal phenomena in the surface layer of the part as problems of the kinetics of the thermal process.

Keywords: heat flow, quality of processed surface, abrasive cutting.

Введение. Источником теплоты, возникающей при абразивной разрезке, является главным образом работа деформирования разрезаемого материала и работа внешнего трения режущих зерен и связки о поверхность материала. Силы трения особенно возрастают при работе затупившимся кругом (рис. 1).

Значительная часть механической работы разрезки тратится на трение, и отношение полезной работы резания ко всей затраченной работе является сравнительно низким. Около 80% всей механической работы разрезки переходит в теплоту, а остальная ее часть превращается в потенциальную энергию деформации кристаллической решетки.

При абразивной разрезке металлических деталей отрезными кругами с боковыми режущими поверхностями в зоне действия зерен резко повышается пластичность металла, благоприятно сказывающаяся на процессе снятия стружки округленными зернами круга. Поверхностный слой разрезанной поверхности ограничивается системой микронеровностей с неравномерным шагом и сравнительно большой разновысотностью. [2].

Основная часть. Для абразивной разрезки характерны высокие механические и тепловые нагрузки, приводящие иногда к трещинам и прижогам на обработанных поверхностях. Теплофизический анализ играет большую роль при разработке рекомендаций для правильной организации процесса разрезки.



Рисунок 1. Процесс абразивной разрезки

Процесс распространения теплоты при разрезке заготовок анализируют для определения закона распределения температур по объему или на поверхности обрабатываемого изделия, поскольку эти температуры в значительной степени определяют остаточные напряжения в разрезаемых деталях. Не менее важно расчетным путем определить температуры па контактных поверхностях режущего абразивного зерна, поскольку температура па этих поверхностях определяет диффузионное разрушение и износ абразивных отрезных кругов.

Рассмотрим расчет температуры, возникающей на режущих зернах отрезного круга. В принципе расчет температуры на контактных поверхностях абразивного зерна можно выполнить аналогично расчету температур на поверхностях лезвийного инструмента, поскольку абразивная разрезка отдельным зерном является одной из разновидностей процесса снятия стружки режущим телом той или иной формы. Стружки, полученные при разрезке, вполне идентичны стружкам, полученным, например, при фрезеровании. Можно различить «надрезцовую» и наружную сторону каждого завитка, последнюю с характерными зазубринами, выдающими элементное строение стружки [3].

Три источника, показанные на (рис. 2), приходится заменять одним, действующим на контактной поверхности зерна.

Рассмотрим некоторые вопросы, относящиеся к схематизации формы абразивных зерен и определению интенсивности источника теплоты, действующего на рабочем торце зерна.

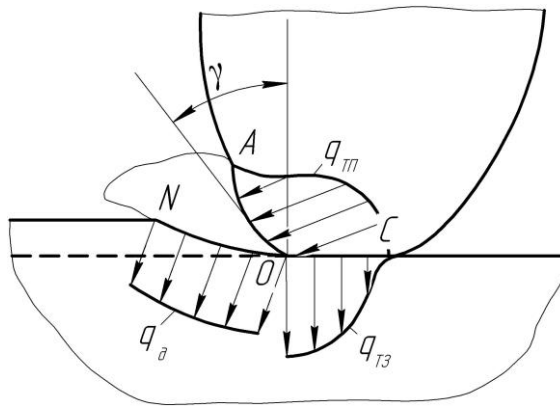


Рисунок 2. Источники теплоты возникающие при резании абразивным зерном

Чтобы приступить к теплофизическим расчетам, необходимо установить интенсивность теплообразующего источника, действующего на торце зерна. Для этой цели общую энергию процесса мы должны распределить между зернами, участвующими в резании. К решению этой задачи можно подойти и с помощью вероятностных расчетов [5-12].

Предположим, что нам известен закон распределения зерен в порошке, из которого прессуется и спекается диск. Расчеты показывают, например, что зерновой состав порошков хорошо описывается законом нормального распределения:

$$y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (1)$$

причем центр группирования x_1 и среднее квадратичное отклонение σ связаны с номинальным (паспортным) размером зерна x_n . При прессовании смеси и спекании круга центр группирования несколько смещается, изменяется и значение σ .

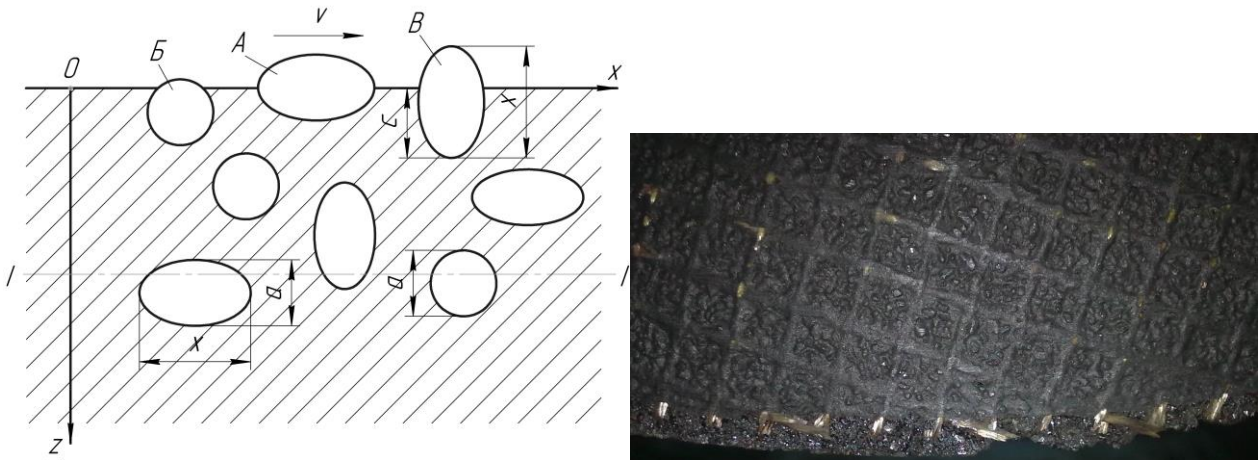


Рисунок 3. Схематизация расположения зерен на боковой поверхности отрезного круга

В общем виде, следовательно, $x_1 = c_1 x_n$ и $\sigma = c_2 x_n$. Есть все основания предполагать, что и для отрезных кругов распределение размеров зерен также подчиняется нормальному закону распределения.

При перемешивании режущих зерен с другими компонентами (наполнителем, связкой) и в процессе прессования круга, каждое зерно может расположиться в объеме последнего как угодно. Для упрощения расчетов примем, однако, что любое зерно может располагаться как угодно по направлению, нормальному к рабочей поверхности диска, но при этом может занимать только любое из трех положений – параллельно осям X , Y , Z (рис. 3). Зернам, расположенным параллельно оси X , присвоим в дальнейшем наименование тип A , соответственно осям Z и Y – тип B и тип B . Появление зерен любого типа равновероятно, т. е. вероятность появления каждого из них равна $1/3$ [7].

Вероятность того, что любая плоскость $I-I$, в том числе и рабочая поверхность круга, пересечет зерно типа A , размер которого лежит от x до $x + dx$, может быть определена как произведение трех вероятностей, а именно:

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{a}{h} \cdot y(x) dx. \quad (2)$$

Первая из них $\left(\frac{1}{3}\right)$ определяет вероятность того, что зерно окажется типа A , вторая $\left(\frac{a}{h}\right)$ – вероятность того, что зерно, имеющее малую ось размером a , расположенное в слое толщиной h ($h = \frac{D}{2}$, где D – диаметр круга), будет пересечено данной плоскостью, третья — $y(x)dx$ — представляет собой вероятность наличия в круге зерен, большая ось которых имеет размер от x до $x + dx$.

Аналогично может быть определена вероятность пересечения рабочей поверхностью отрезного круга зерен типов Б и В. Суммируя эти вероятности и интегрируя далее по x от x_{min} до x_{max} , получаем

$$n_0 = \frac{(2a_0+1)K}{200\pi a(x_1^2+3\sigma^2)} \text{ зёрен/мм}^2 \quad (3)$$

где n_0 – номинальное количество зерен, располагающееся в среднем на каждом квадратном миллиметре рабочей поверхности круга. Предположив $x_1 = c_1 x_n$ и $\sigma = c_2 x_n$ и подставляя эти значения в формулу (3), пишем

$$n_0 = \frac{(2a_0+1)K}{200\pi a x_n^2 (x_1^2+3c_2^2)} \text{ зёрен/мм}^2. \quad (4)$$

Исследования показали и обработка данных, опубликованных в технической литературе, позволяют для абразивных кругов принять ориентировочно $c_1 \approx 0,77$; $c_2 \approx 0,105$; $a_0 \approx 0,6$; $a \approx 0,36$. Тогда

$$n_0 \approx \frac{K}{65x_n^2}. \quad (5)$$

По мере развития работ, посвященных анализу закономерностей зернового состава дисков, величины c_1, c_2 и a_0 должны уточняться, а с ними уточняться и формулы по определению номинального количества зерен, размещающихся в среднем на каждом квадратном миллиметре поверхности отрезного круга.

Приходится называть число n_0 номинальным потому, что количество зерен, фактически располагающихся на поверхности круга, всегда будет меньше n_0 . Дело в том, что часть зерен в процессе обработки выкрошится и покинут поверхность режущего инструмента. Это будут зерна, глубина заделки которых (размер c на рис. 3) окажется недостаточной, чтобы противостоять выворачиванию зерна из связки. Вероятностные расчеты показывают, что фактическое количество зерен, располагающихся на поверхности круга, можно определить, если умножить значение n_0 на коэффициент $1 - \varepsilon$, где ε – относительное критическое значение глубины заделки зерен. Под последней понимается отношение глубины заделки c_{min} , при которой зерно покидает круг, к его размеру в направлении, перпендикулярном к рабочей поверхности круга. Например, для зерна типа В, расположенного в приповерхностном слое круга (рис. 3), получаем

$$\varepsilon = \frac{c_{min}}{x}. \quad (6)$$

Следовательно, в действительности на рабочей поверхности круга располагается

$$n \approx n_0(1 - \varepsilon) \text{ зерен/мм}^2. \quad (7)$$

Рассмотрение под микроскопом рабочей поверхности режущего инструмента показывает, что величина $\varepsilon = 0,2 \div 0,7$. Меньшие значения ε соответствуют меньшей зернистости и металлической связке, большие — крупным зёрнам и бакелитовой связке.

Выводы. Использование температурно-скоростного цикла, что в свою очередь

позволяет в определенной степени прогнозировать количественные и качественные изменения свойств поверхностного слоя и на основе корректировки основных параметров теплового процесса, т.е. режимов резания, обеспечивать заранее заданное качество поверхностного слоя разрезаемой детали. Рациональное применение теплофизических расчетов позволяет достичь улучшения эксплуатационных характеристик деталей, аналогично тому, как имеет место после выполнения специальных упрочняющих операций.

Список литературы

1. Левченко Е.А. Моделирование энергоемкости пластической деформации работы режущих поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке труб // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – Пермь: Изд-во ФГАОУ ВО ПНИПУ, 2022. – Том 24, № 1. – С. 15 – 20.
2. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной разрезки труб отрезными кругами / Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Вып. № 3. – С. 46 – 51.
3. Братан С.М. Определение вероятности изнашивания вершины зерна отрезного круга в процессе разрезки труб / С.М. Братан, Е.А. Левченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 6 (59) частина 1. – С. 40–43.
4. Левченко Е.А. Кинетика процесса трения при абразивной разрезке труб / Е.А. Левченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета Технические науки. – Симферополь: Изд-во НИЦ КИПУ, 2022. – Выпуск №3(77). – С. 169 – 175.
5. Левченко Е.А. К вопросу применения абразивно-молекулярной гипотезы при исследовании качества поверхностного слоя разрезаемых труб при абразивной разрезке / Е.А. Левченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – Пермь: Изд-во ФГАОУ ВО ПНИПУ, 2022. – Том 24, № 4. – С. 87 – 95.
6. Werner, G.: High-Efficiency-Deep-Grinding (HEDG) — eine neue Variante des Hochleistungsschleifens verbindet das Hochgeschwindigkeits und Tiefschleifen, Deutsche Industrieforum für Technologie, 1995
7. W. König, B. Stuckenholz. High performance grinding with CBN wheels — pre-conditions for process economy and successful application, Advanced Manufacturing Processes, 1987, 2:1–2, 105–139.
8. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак // – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
9. Jin T., Stephenson D. J. Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43. 2003. P. 1129–1134.
10. Black, S. C. The Effect of Abrasive Properties on the Surface Integrity of Ground Ferrous Materials, PhD thesis, Liverpool John Moores University. 1996.
11. Ohishi, S., Furukawa, Y. Analysis of Workpiece Temperature and Grinding Burn in Creep-Feed Grinding, Bulletin of JSME, 28,242, 1775–1781. 1985.
12. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ.

Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114

13. Братан, С. М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / Братан С.М., Головин В.И., Новоселов Ю.К., Дымченко И.А. Научные технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 30-38.

УДК 658.512.2(075.8)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ НЕТРИВИАЛЬНОГО ПАРАДОКСАЛЬНОГО МЫШЛЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

А.Г. Карлов¹

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснована целесообразность и анализируется опыт организации системного подхода к формированию основ инженерного изобретательского мышления не только у студентов технических и технологических ВУЗов, но и у школьников и дошкольников. Чтобы успешно решить проблемы импортозамещения во всех отраслях промышленности РФ, нужны инженерные кадры, которые способны быстро адаптироваться к решению любых сложных междисциплинарных проблем. Такие инженеры должны обладать навыками изобретательского мышления и тогда они будут способны создавать глобально конкурентоспособные инновационные технологии и технические системы. Анализируются современные проблемы и опыт формирования навыков нетривиального парадоксального мышления при подготовке инженерных кадров.

Ключевые слова: Теория решения изобретательских задач - ТРИЗ; Общая теория сильного мышления - ОТСМ; Инновационная экосистема; МПиО – метод проб и ошибок; АРИЗ – алгоритм решения изобретательских задач; Функционально-ориентированное мышление; Серийный инноватор.

CONTEMPORARY PROBLEMS AND EXPERIENCE IN DEVELOPING NON-TRIVIAL PARADOXICAL THINKING SKILLS IN THE TRAINING OF ENGINEERING PERSONNEL

A.G. Karlov¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The expediency and experience of organizing a systematic approach to the formation of the foundations of engineering thinking are substantiated not only among students of technical and technological universities, but also among schoolchildren and preschoolers. To successfully solve the problems of import substitution in all industries of the Russian Federation, we need engineering personnel who are able to quickly adapt to solving any complex interdisciplinary problems. Such engineers must have inventive thinking skills and then they will be able to create globally competitive

innovative technologies and technical systems. The article analyzes modern problems and the experience of developing skills of non-trivial paradoxical thinking in the training of engineering personnel.

Keywords: Theory of inventive problem solving; OTSM - General theory of strong thinking; Innovation ecosystem; MTaE – trial and error method; ARIZ – algorithm for solving inventive problems; Functionally oriented thinking; Serial innovator.

Введение. Приоритетная роль специалистов, которые способны оперативно и качественно решать современные задачи проектирования и производства актуальных и конкурентоспособных инновационных технических изделий и технических систем ни у кого не вызывает сомнений. Традиционный подход к обучению подобных специалистов состоит в том, что создаются и развиваются программы довузовской подготовки школьников. Созданы и успешно выполняют свои функции различные центры поддержки творческой молодёжи, такие как «Сириус» — образовательный центр поддержки и сопровождения одарённых детей в Российской Федерации и им подобные. Центр создан в 2015 году образовательным фондом «Талант и успех» по инициативе президента России Владимира Путина. Цель работы — раннее выявление, развитие и дальнейшая профессиональная поддержка одарённых детей, проявивших выдающиеся способности в области искусств, спорта, естественнонаучных дисциплин, а также добившихся успеха в техническом творчестве.

Обучение в центре проходят дети 10–17 лет из всех субъектов РФ и стран СНГ, демонстрирующие выдающиеся успехи в науках, спорте, искусстве. Образовательные программы проходят по направлениям: «Наука» (математика, информатика, физика, химия, биология, лингвистика, проектная деятельность), «Искусство» и «Спорт».

Организуются и проводятся всероссийские и международные олимпиады, которые выявляют лучшие проекты и перспективных авторов этих разработок как технических, так и технологических. Значительная часть учёных и педагогов, которые готовят школьников к творческой деятельности в этих направлениях полагают, что возраст 10-17 лет является необходимым и достаточным для развития всех умений и навыков, обеспечивающих высокие результаты такой деятельности начинающих учёных и инженеров.

Однако в России имеются немало успешных примеров того, что подготовку подрастающего человека к подобной творческой деятельности необходимо осуществлять с дошкольного возраста и продолжать в начальной школе, т.к. основы мышления человека закладываются в период 5-10 лет. Творческая работа по конструированию будущего мира характеризует деятельность инженера, требует особого склада мышления.

Авторы таких работ как [1,2,3,4,5] утверждают, что в современном образовании идёт активный поиск инновационных технологий, позволяющих эффективно решать поставленные задачи при максимальном использовании ресурсов самих детей в тоже время с минимальными временными и эмоциональными затратами педагога. Методы становления основ изобретательского мышления детей младшего школьного возраста и дошкольников являются актуальными и перспективными в данном направлении.

Логическим продолжением процессов формирования навыков нетривиального парадоксального мышления при подготовке инженерных кадров в высших учебных заведениях, школах и дошкольных учреждениях является создание образовательных программ для специалитета, магистратуры и аспирантуры которые позволят обеспечить выпускников ВУЗов знаниями, умениями и практикой создания изобретений по целевым заказам промышленных предприятий, оборонно-промышленного и аграрного секторов экономики. При этом такие выпускники должны будут создавать изделия и технологии на уровне глобально конкурентоспособных инноваций.

Целью настоящего исследования является выявление, анализ, обоснование целесообразности применения системного подхода к формированию нетривиального изобретательского инженерного мышления не только у студентов и специалистов, но и у детей младшего возраста. Проводятся исследования и анализ новых форм наставничества молодых людей разного возраста. В этом направлении реализуются результаты разнообразных научно-исследовательских работ федерального уровня. В качестве примера можно привести такую НИР как «Разработка национальной концепции управления талантами в России» (ВШГУ РАНХиГС и АНО «Россия – страна возможностей»). А также партнерскую программу Саммита молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки» НТУ Сириус Фонда «Талант и успех»; Всероссийский конкурс научно – технологических проектов школьников «Большие вызовы» (ОЦ Сириус); проекта «Кадры будущего для региона» АСИ [6,7].

В мире бизнеса, который поддерживает и продвигает инновации, все устаревает очень быстро, особенно знания. Поэтому, как считают многие авторитетные учёные и известные инноваторы, многое, чему нас учат в школах и университетах очень быстро перестаёт быть актуальным. По мнению многих экспертов, знание в области ОТСМ-ТРИЗ (Теория решения изобретательских задач и Общая теория сильного мышления)— это такое знание, которое не устаревает и помогает человеку творчески мыслить.

Многие компании в мире, бренды которых хорошо всем известны, активно берут на вооружение инструменты, повышающие креативность сотрудников и уровень инновационности бизнеса. Такие компании проводят активный поиск молодых людей, способных мыслить и работать творчески.

Будущее России зависит во многом от того, как мы сегодня воспитываем, чему и как обучаем детей. Уровень жизни нашей страны, прогресс в развитии оборонно-промышленного сектора, различных отраслей промышленности, аграрного сектора в недалёком будущем зависит от эффективности и темпов пополнения кадров, способных динамично создавать инновационные технологии.

И молодое пополнение инженерных кадров, учёных, квалифицированных рабочих, способных мыслить нетривиально при решении сложных проблем следует готовить, основываясь на фактах, что лучшие в мире серийные инноваторы родились и начинали созидать в СССР и России. Что и ТРИЗ и ОТСМ формировали и распространили по всему миру наши соотечественники.

Не удивительно, что Федеральным государственным образовательным стандартом дошкольного образования (ДО) определены целевые ориентиры обучающихся на завершении этого этапа образования. Согласно Федеральной образовательной программе ДО, необходимо формирование не только предпосылок к учебной деятельности, включающих в себя любознательность, устойчивый познавательный интерес, высокий уровень воображения, наличие коммуникативных навыков и других качеств личности интегративного характера, но и вооружение обучающихся основам изобретательства, конструктивной работы.

При этом формулируется невиданная ранее задача для дошкольников и младших школьников. Планируется заложить фундамент, способствующий формированию предпосылок и основ изобретательского (инженерного) мышления.

В современном образовании идёт активный поиск инновационных технологий, позволяющих эффективно решать поставленные задачи при максимальном использовании ресурсов самих детей в тоже время с минимальными временными и эмоциональными затратами педагога. Методы становления основ изобретательского инженерного мышления дошкольников и младших школьников являются актуальными и перспективными в данном направлении [1-3].

Под научным руководством Мастера ТРИЗ, кандидата педагогических наук Сидорчук Т.А. в РФ разработана и внедряется технология формирования предпосылок и основ изобретательского (инженерного) мышления у детей 3-7 лет. Технология эта создана на основе адаптированных методов теории решения изобретательских задач (ТРИЗ – автор Г.С. Альтшуллер, 1946 г.), общей теории сильного мышления (ОТСМ – автор Н.Н. Хоменко, 1994 г.) и комплекса методов развития творческого воображения (методы РТВ – мировой фонд). Коллективом авторов из Ульяновска разработан и апробирован способ перехода методов активизации мышления и воображения в содержание дошкольного образования. Дети усваивают способы комбинаторики, преобразования признаков объектов, систематизации, классификации, у них формируются определённые познавательные способности, проявляются возможности научить кого-то работать на их основе, что позволяет формировать основы изобретательского нетривиального мышления. Фактически технологические цепочки трансформируются из методов в содержание работы с детьми. Алгоритмы при систематическом использовании усваиваются достаточно быстро и позволяют ребёнку организовать собственную проектную работу созидательного плана [1].

Подрастающий человек должен обладать такими способностями, которые позволят ему в будущем не только успешно социализироваться, но и быть готовым к активной, значимой для общества, творческой деятельности продуктивного характера.

Такая деятельность характеризуется понятием «инженерия». Как подчёркивает Сидорчук Т.А., мы понимаем изобретательское (инженерное) мышление как процесс мыслительной деятельности, включающий в себя оперирование моделями поиска и обработки информации, прогноза развития рукотворных систем, работу с открытыми задачами (формулировка, построение решения и реализация). Творческая работа по конструированию будущего мира характеризует деятельность инженера, требует особого склада мышления [1].

Поэтому подготовку подрастающего человека к такой деятельности необходимо осуществлять с дошкольного возраста и продолжать в начальной школе, т.к. основы мышления человека закладываются в период 5-10 лет.

Но мы не можем говорить о полноценном инженерном мышлении в силу того, что это понятие присуще профессиональной деятельности взрослого человека. Тем не менее, общее понимание инженерного мышления в том, что это высший процесс не только отражения функциональной принадлежности объектов, взаимосвязей и взаимозависимостей, но целенаправленная спланированная деятельность, направленная на достижение определённого социально значимого, прогнозируемого результата [1].

Сидорчук Т.А. творчески подходит к формированию программ технология формирования основ инженерного мышления у детей. Она провела и продолжает проводить десятки семинаров для педагогов дошкольного образования как в Ульяновске, так и во многих городах РФ и за рубежом. Совместно с Хоменко Н.Н. она подготовила и опубликовала несколько монографий на эту тему. Причём и книги изданы не только в России, но и за рубежом Книги переведены на английский, корейский и японский языки. Это свидетельствует о значительном интересе к обсуждаемой в статье теме развития нетривиального инженерного мышления у дошкольников и школьников.

Реализуя свои авторские программы и технологии формирования основ инженерного мышления у детей, Сидорчук Т.А. с коллегами постоянно находит новые решения возникающих при этом проблем. Проводится образовательная работа по формированию у детей мыслительных операций моделирования, конструирования и создание условий усвоения ребёнком алгоритмов системного мышления, функционального анализа, решения изобретательских задач, создания фантастических объектов и организации собственной проектной деятельности [8,9,10,11].

О новых формах наставничества, способствующих формированию навыков нетривиального парадоксального мышления при подготовке инженерных кадров.

Директор образовательного фонда «Потенциал плюс» (Москва), кандидат психологических наук Г. Е. Пазекова сформулировала и активно использует в своих публикациях и презентациях ключевые маркеры развивающей модели наставничества «1++1». При этом происходит дифференциация профилей наставничества на производстве, в социальной сфере, в образовании, в предпринимательстве. Творческим коллективом под руководством Пазековой Г.Е. созданы и внедряются в практику развивающие модели наставничества. Сформулированы и применяются практические инструменты наставничества: «Форсайт личного развития», «Совместимость в паре», «Развивающие опции наставничества. Версия ПРО». На семинарах этого автора возможно осуществить виртуальное путешествие по практикам наставничества в рамках международных кейсов: Англии, Германии, Израиля, Швейцарии, Австралии, Китая.

Авторы международных исследований (www.mentoring.org, 2019) утверждают, что к преимуществам наставничества следует отнести то, что 90% людей, у которых был наставник, заинтересованы в том, чтобы самим стать наставниками, а также что на 78% более вероятно станут волонтерами с системой ценностей.

В работах Пазековой Г.Е. представлены и новые виды наставничества:

- Партнёрское наставничество, по типу «равный – равному» (Peer-to-peer Mentoring), когда наставник является равным по уровню подопечному, но обладает большими знаниями, опытом, которыми и делится с ним;
- Виртуальное наставничество, (Virtual Mentoring), когда советы и рекомендации наставника подопечному даются в режиме онлайн. При любой необходимости, подопечный самостоятельно обращается к наставнику;
- Флэш наставничество, (Flash Mentoring), предполагающее одноразовые встречи. Такая разовая помощь эффективна в решении несложных ситуаций или, при необходимости, получить совет от «точечного» специалиста в ограниченном временном интервале;
- Реверсивное наставничество, (Reverse Mentoring), это конвенция поколений, когда молодежь обучает старших коллег современным технологиям;
- Труба экспертов, при которой обеспечивается командная консультация поочередно у нескольких отраслевых экспертов в формате питчингов с обратной связью.

Система наставничества [1++1] и её практические инструменты. Это взаимный процесс роста и развития, в которой один человек (наставник) помогает второму (наставляемому) сформулировать мечту и достичь целей. При этом второй помогает первому осмыслить свой жизненный путь, жизненные ценности.

Авторы рекомендуют оценивать совместимость в паре «Наставник – Наставляемый», применяя программно - аппаратный комплекс VIBRAIMAGE.

Работа с таким комплексом позволяет: оценить психоэмоциональный фон человека.

При этом возможно достаточно объективно провести анализ характера и силы восприятия человеком информации и событий. Определить личностные предпочтения для целевого удовлетворения спроса любого типа потребителей.

Сравнить виброизображения различных людей. Определение взаимную совместимость людей. Это даёт возможность объективно оценить взаимную реакцию собеседников в ходе диалога.

Такая методика [1++1] и аппаратное обеспечение её позволяют определить Метрики результата.

И как итог, выясняются показатели эффективности работы тандема:

Для Наставляемых:

Произошло карьерное развитие.

Достигнут новый уровень личностного и профессионального роста «Копилка личных достижений».

Реализован совместный проект с Наставником.

Появилось желание стать Наставником.

Для Наставников:

Вложение внимания. Работа в точке максимальной радости, развития и результатов.

Усилены сильные стороны. Актуализирован личный план развития с опорой на то, что получается, придает силу.

Фокус на мастерство. Определен вектор личностного роста.

Найдены перспективные управленческие кадры.

Привлечена отраслевая / функциональная экспертиза.

Инициированы новые проекты.

Проект «Академия наставников» Фонда «Сколково» направлен на развитие молодежного технического творчества и технологического предпринимательства, а также на создание системы массового обучения, оценки, сертификации и трудоустройства наставников проектной и кружковой деятельности [12].

**Актуальность проблемы создания в образовательной сфере России
системной вертикали подготовки специалистов, обладающих навыками
нетривиального изобретательского инженерного мышления.**

В Российской Федерации сформировались и требуют оперативного решения множество задач стратегического и тактического уровня. При этом тезис «Кадры решают всё» актуален как никогда.

Множество проблем необходимо решить в короткие сроки как в оборонно-промышленном секторе экономики, так и в других важнейших отраслях промышленности и аграрного сектора нашей страны.

Опыт развития навыков нетривиального парадоксального мышления у будущих инженеров известен в ряде ВУЗов РФ. Однако по сих пор Министерством науки и высшего образования РФ не сформированы и не применяются для этих целей образовательные программы, позволяющие готовить будущих профессиональных изобретателей-инноваторов в рамках подобной целевой парадигмы подготовки, специалистов, магистров, аспирантов инвариантно к полученному ими ранее направлению подготовки бакалавров или специалистов. Хотя подобные программы подготовки магистров имеются в некоторых ВУЗах за рубежом уже два десятка лет.

Так, например, наш соотечественник Н.Н. Хоменко – один из руководителей Минской школы ТРИЗ (Теория решения изобретательских задач), ученик создателя ТРИЗ Альтшуллера Г.С., был приглашён в период с 1999 по 2010 год в INSA (Страсбург, Франция) и работал профессором этого Университета. Он стал научным руководителем уникальной программы: Advanced Master in Innovative Design (Продвинутый Мастер Проектирования Инноваций) для специалистов и руководителей проектных отделов и научно-исследовательских центров. Этот опыт был одобрен Министерством образования Франции. А затем Программа была аккредитована международной ассоциацией вузов Conférence Des Grand Ecoles.

Это был первый опыт в мире в области образования, который позволил обеспечить

образовательный и научный уровень Магистра Проектирования Инноваций, причём инвариантно к профилю первоначального технического образования. Как эксперт и тренер Николай Хоменко принимал участие в решении комплексных междисциплинарных проблемных ситуаций по приглашению ведущих компаний мира.

Учеником и коллегой Хоменко Н.Н. в этой области творческой деятельности был все эти годы Шпаковский Н.А., к.т.н., Мастер ТРИЗ. Он присоединился в 90-е годы и работал в коллективе Проекта «Изобретающая Машина» (1995 – 2000) руководителем логической части модуля «Прогноз» (Минск, Беларусь). Затем был ТРИЗ консультантом 2000 - 2003: в Институт передовых технологий (SAIT), SAMSUNG, а в 2004 – 2005 в SAMSUNG SDI., Сувон, Корея. Позже в 2010-2014 Шпаковский Н.А. был приглашен ТРИЗ консультантом и преподавателем в сталелитейную компанию POSCO, Поханг, Корея [13,14,15,16].

Шпаковский Н.А. автор многочисленных и популярных монографий и учебных пособий по ОТСМ-ТРИЗ технологиям творчества. Им создан сайт – «Дистанционный учебный курс «ТРИЗ-тренер». В соавторстве со Шпаковским Н.А. автором этого коммюнике подготовлено и издано учебное пособие. В этой книге подробно отражена история развития изобретательства в мире, хронология создания и развития отечественных программных продуктов генерации инновационных проектов, представлены примеры работы с отечественным софтом Solving Mill-2.0 и его результативности в процессе создания инновационных проектов в различных сферах промышленности и аграрного сектора.

Благодаря многолетнему творческому сотрудничеству автора этого коммюнике с Хоменко Н.Н. и Шпаковским Н.А. в Севастопольском государственном университете стартовала работа Лаборатории ТРИЗ-ОТСМ технологий целевого изобретательства. Для этой Лаборатории ТРИЗ-ОТСМ СевГУ приобретено современное компьютерное оборудование, разработаны программы дополнительного профессионального образования (ДПО целевого изобретательства).

В сентябре 2021 года студенты Политехнического института и других подразделений Севастопольского государственного университета (СевГУ) различных направлений обучения получили доступ к новому отечественному русскоязычному программному продукту Solving Mill-2.0. Этот современный софт обеспечивает поддержку изобретательской деятельности и относится к типу CAI (Computer Aided Innovation) - Автоматизация инновационных процессов. Софт предлагается в варианте применения SaaS (Software as a Service) - Облачное программное обеспечение. Профессиональное применение Solving Mill-2.0 позволяет обеспечить: повышение функциональности инновационных продуктов; снижение себестоимости продукта; устранение проблемных ситуаций на производстве.

Теоретическая основа: теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) и смежные дисциплины.

Методическая основа: алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС-2015).

Алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС-2015) эффективен для работы с проблемами, которые не решаются применением стандартных технических знаний и традиционными инженерными методами. Он предполагает три этапа работы над проектом.

На первом этапе анализируется исходная проблемная ситуация: изучается система, породившая нежелательный эффект; определяются проблемное место в системе и конфликтное взаимодействие; формулируются задачи отыскать способы устранения конфликта.

На втором этапе нужно найти решение задачи. Для этого задача рассматривается с разных сторон, строятся разные её модели: формализованная, двухпараметрическая, структурная и однопараметрическая. Для каждой модели задачи нужно найти принципиальное преобразование, устраняющее указанный в ней недостаток, и построить модель решения. После этого определяется способ реализации этого преобразования в конкретной полезной

системе. Четыре итерации работы с задачей дают обычно несколько предварительных решений, на основе которых можно сгенерировать их дополнительные варианты. Затем из совокупности предварительных решений синтезируется финальное решение.

Третий этап алгоритма — проверочный. Нужно экспериментально обосновать предложенное решение, проработать детали его технического воплощения и проверить, исправляется ли проблемная ситуация предложенным решением [15,16]. Практическая основа: многолетний опыт решения производственных задач и организации системного изобретательства на крупнейших мировых компаниях, например, САМСУНГ и ПОСКО.

Софт построен на использовании инструментов ОТСМ-ТРИЗ. Авторы разработки из Минска Шпаковский Н.А. и его коллеги – решатели задач, изобретатели с опытом работы на «передовой целевого изобретательства» (Samsung, POSCO, Škoda, Midea и др.). Софт направляет пользователя к сильному решению наиболее быстрым и результативным маршрутом. Ядро структуры софта – это гибкий диалоговый темплейт, заполняя который пользователь, собственно, и решает задачу.

На Рис.1 представлена развернутая схема алгоритма АИПС-2015, на которой перечислены практически все инструменты ОТСМ-ТРИЗ технологии поддержки процессов создания инновационных технологий как в области автоматизации процессов и систем, так и во многих иных сферах творческой деятельности человека.

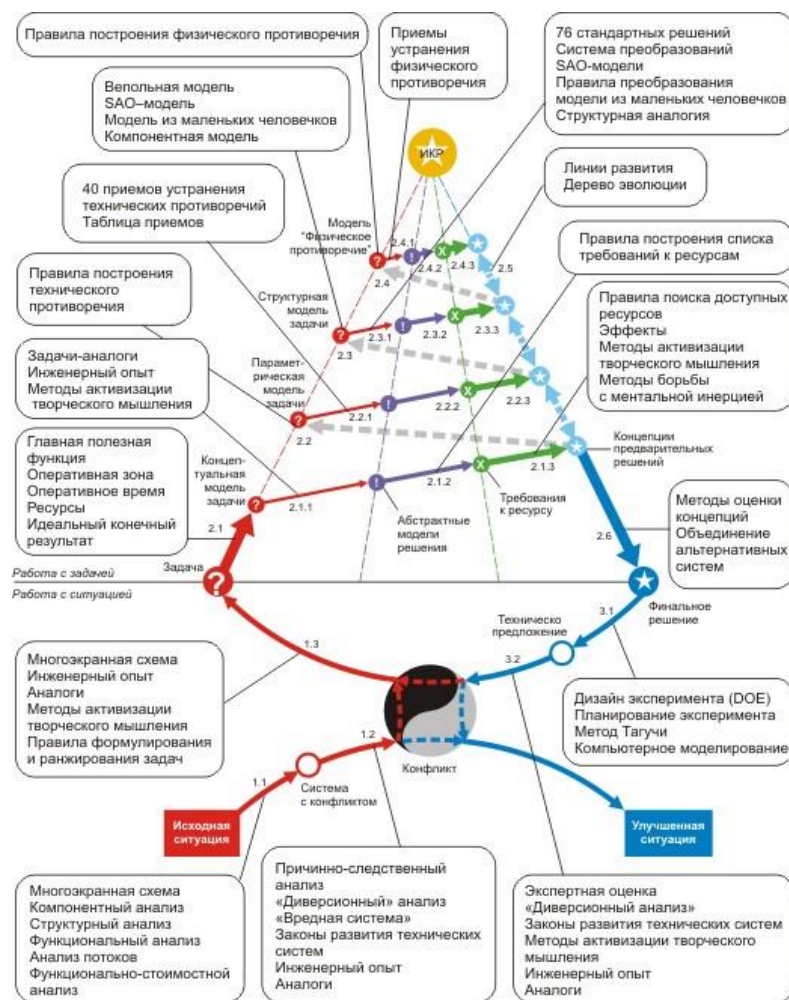


Рисунок 1. Развернутая схема алгоритма АИПС-2015 [15,16]

Вся сопутствующая информация структурирована таким образом, чтобы эффективно поддерживать процесс решения. Даны подробные разборы задач (кейсы), выполненные консультантами-решателями. Софт обеспечивает поддержку процесса решения нетривиальных технических задач: от анализа проблемной ситуации до проверки эффективности полученного решения. Важно подчеркнуть, что эти задачи могут быть связаны с процессами разработки, производства, хранения, транспортировки, продажи продукции, организации работы предприятия, рекламы и т.п.

Алгоритм решения задач и инструменты программы универсальны для проблем из любых областей техники. Могут применяться для других видов деятельности, где возникают нетривиальные задачи. Подобные задачи, как правило, не удаётся решить традиционными способами. Нужны решения, выходящее за пределы опыта и профессиональных компетенций решателя (так называемые изобретательские задачи). Предусмотрена поддержка командной работы над проектом.

В финале диалога решателя с софтом пользователь имеет: решённую проблему; зафиксированный процесс работы над проблемой в виде хорошо структурированных текстов, рисунков, схем; заготовку формулы изобретения, которая автоматически компилируется на основе внесённых данных. Это не просто формальный отчёт по проекту, но документ, где изложена вся логика полученных решений и выводов – убедительные аргументы при защите полученных решений перед руководством.

Преподаватели и научные сотрудники кафедры АТМ (Автоматизация и технология машиностроения) Политехнического института СевГУ на протяжении последних тридцати лет активно сотрудничают со школами, лицеями, техникумами в различных городах РФ, предприятиями, которые являются индустриальными партнёрами кафедры, по обучению современным технологиям развития умений и навыков изобретательского нетривиального мышления. Автор этой статьи совместно с Мастером ТРИЗ Шпаковским Н.А. был приглашён в качестве эксперта и модератора проведения траектории ТРИЗ на Всероссийский инженерный конкурс (ВИК-2016 на базе Санкт-Петербургского политехнического университета и ВИК-2019 на базе КФУ в Симферополь). Проведенные ВИК показали потенциал и высокую эффективность применения на практике упомянутого выше отечественного программного обеспечения Solving Mill-2.0. Участники этих ВИК в короткое время успешно познакомились с софтом и применили его для решения актуальных изобретательских проблем некоторых важнейших отраслей отечественной промышленности.

Выводы: 1 Актуальность проблем создания образовательной «вертикали» - многоступенчатой системной технологии обучения нетривиальному инженерному изобретательскому мышлению специалистов, способных к творческой и эффективной созидательной деятельности для обеспечения процессов импортозамещения и создания условий непрерывности создания инновационных продуктов и технологий не вызывает сомнений. 2 Реализация таких процессов в РФ может ускориться, если активно внедрять в учебный процесс опыт и творческое наследие отечественных инноваторов и авторов ОТСМ-ТРИЗ технологий. 3 Следует учесть при этом опыт отечественных специалистов и позитивные результаты их творческой деятельности в области формирования нетривиального изобретательского инженерного мышления не только студентов и специалистов отечественных предприятий, но и детей как школьного, так и дошкольного возраста.

Список литературы

1. Сидорчук Т.А. Формирование основ инженерного мышления у дошкольников: методическое пособие. – М.: КТК «Галактика», 2025. – 224 с.: ил.

2. Гуткович И.Я., Сидорчук Т.А. Формирование системного мышления дошкольников. – АО «Первая Образцовая типография», филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ», 2015. – 80 с.
3. Сидорчук Т.А., Хоменко Н.Н., Карлов А.Г. О проблемах и новых подходах к процессам развития креативного мышления начинающих изобретателей на базе ТРИЗ-ОТСМ-технологий в рамках проекта «Джонатан Ливингстон». Сборник научных статей "Причинные аспекты развития живых систем - IX". Под ред. В.П. Гоча. - Севастополь: Издатель Карпин, 2006, – с. 302-309.
4. Семенова Н.В., Сидорчук Т.А. Обучение дошкольников способам работы с проблемами. Методическое пособие для педагогов. – АО «Первая Образцовая типография», филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ», 2021. – 160 с.
5. Хоменко Н.Н., Сидорчук Т.А. Проблемные ситуации и творческие задания как средство формирования исследовательских навыков обучающихся// Сборник методических материалов для педагогов дошкольных учреждений. – Ульяновск, ИПК ПРО, 2008: 66 с.
6. Пазекова Г.Е., Пазеков Е.В., Феноменология психологической гармонии личности. Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (часть 15). – С. 3399-3403 URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37794> (дата обращения: 03.06.2025).
7. Гондарева Л.Н., Пазекова Г.Е. Со-развитие креативности, интеллекта и умственной работоспособности у старших школьников профильных классов. Фундаментальные исследования. 2014. № 6 (часть 3). – С. 602-606 URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34210> (дата обращения: 03.06.2025).
8. Гуткович И.Я., Сидорчук Т.А. Формирование системного мышления дошкольников. – АО «Первая Образцовая типография», филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ», 2015. – 80 с.
9. Семенова Н.В., Сидорчук Т.А. Обучение дошкольников способам работы с проблемами. Методическое пособие для педагогов. – АО «Первая Образцовая типография», филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ», 2021. – 160 с.
10. Хоменко Н.Н., Сидорчук Т.А. Проблемные ситуации и творческие задания как средство формирования исследовательских навыков обучающихся// Сборник методических материалов для педагогов дошкольных учреждений. – Ульяновск, ИПК ПРО, 2008: 66 с.
11. Sidorchuk T. Khomenko N. Thoughtivity for Kids. – USA, GOAL/QPC. 2006. – 264 с.
12. Пазекова Г.Е., Проектный наставник в интенсиве Университета 20.35 <https://intensive.2035.university/mentors21>
<https://yandex.ru/search/?text=https%3A%2F%2Fintensive.2035.university%2Fmentors21&clid=2226553&banerid=0766004839%3A64c526dfe8655efcf04f098c&win=430&lr=959>
13. N. Khomenko. «General Theory on Powerful Thinking (OTSМ): Digest of Evolution, Theoretical Background, Tools for Practice and Some Domain of Application». Tokyo, 2010. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: // <http://jlproj.org>
14. Альтшуллер Г.С. Поиск новых идей: от озарения к технологии: (Теория и практика решения изобретательских задач). /Г.С. Альтшуллер, Б.Л. Злотин, А.В. Зусман, В.И. Филатов. - Кишинев: Картя молдовеняскэ, 1989.- 382 с.
15. Шпаковский Н.А.. ОТСМ-ТРИЗ. Подходы и практика применения. — М.: Инфра-М, 2018. – 348 с.

16. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие (учебное пособие) – М.: Центр каталог, 2019. – 536 с. – (Вузовский учебник).

УДК 621.7

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАНЕСЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Н. Круговой¹

¹*Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация*

АННОТАЦИЯ

При выполнении покрытий в настоящее время часто используют материалы, состоящие из двух компонентов, которые в отдельности могут храниться длительное время, а после их смешивания происходит процесс полимеризации и образуется прочное покрытие. Это покрытие обеспечивает защиту от коррозии, взаимодействия с агрессивными материалами. Оно может придавать теплоизоляционные и электроизоляционные свойства. Примером могут служить различные лаки, полиуретановое покрытие. При смешивании компонентов очень важно соблюдать их соотношение. При использовании подачи жидкостей с помощью сжатого воздуха при изменении температуры вязкость веществ изменяется по-разному. В результате соотношение компонентов изменяется и качество покрытия ухудшается.

Для обеспечения заданного соотношения компонентов при изменении температуры разработана автоматизированная система, в которой расход каждого вещества регулируется отдельно с помощью замкнутой системы регулирования.

В рамках данной работы рассматривается автоматизированная система нанесения двухкомпонентных покрытий с отдельным регулированием расхода каждого компонента.

Ключевые слова: покрытие, нанесение, компонент, автоматизация.

AUTOMATED SYSTEM FOR APPLYING TWO-COMPONENT COATINGS

A.N. Krugovoy¹

¹*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

ABSTRACT

Currently, coatings often use materials consisting of two components that can be stored separately for a long time, and after mixing, the polymerization process occurs and a durable coating is formed. This coating provides protection against corrosion and interaction with aggressive materials. It can impart thermal insulation and electrical insulation properties. An example is various varnishes, polyurethane coating. When mixing the components, it is very important to observe their ratio. When using compressed air to supply liquids, the viscosity of substances changes in different ways as the temperature changes. As a result, the ratio of components changes and the coating quality deteriorates. To ensure a given ratio of components when the temperature changes, an automated system has been developed in which the consumption of each substance is regulated separately using a

closed control system. In the framework of this work, an automated system for applying two-component coatings with separate flow control of each component is considered.

Keywords: coating, application, component, automation.

Структурная схема автоматизированной системы представлена на рисунке 1. Компоненты покрытия заливаются в емкости V1 и V2 и герметично закрываются крышками. В емкости подается сжатый воздух, с давлениями p1 и p2, величины которых регулируются с помощью двух пропорциональных распределителей P1 и P2, запитанных от источника питания с давлением pm. В результате компоненты с расходами Q1 и Q2 поступают в смешительную камеру K, где после тщательного перемешивания поступают с расходом $Q=Q1+Q2$ в распылительную головку. Внутри емкостей установлены датчики температуры T1 и T2, информация от которых (Ut1 и Ut2) поступает на аналоговые входы программируемого логического контроллера PLC. На вход контроллера подается задающее напряжение Uz, пропорциональное требуемому расходу Q, а напряжения U1 и U2, подаваемые на вход распределителей, вычисляются в зависимости от температуры компонентов t1 и t2.

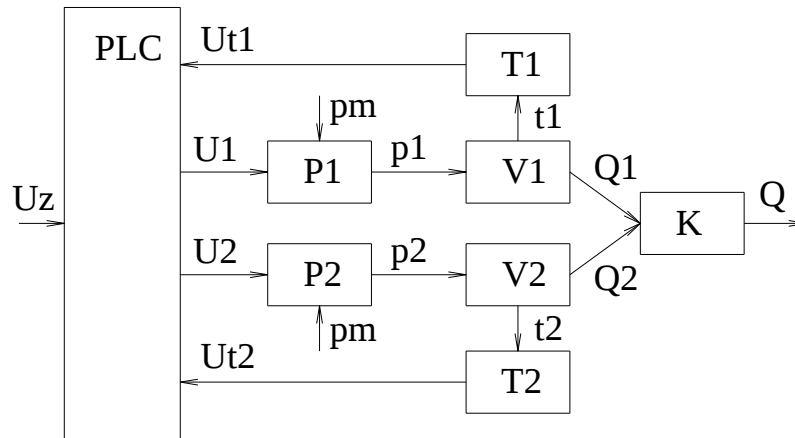


Рисунок 1. Структурная схема автоматизированной системы

Обобщенная эквивалентная схема гидравлической системы подачи компонентов построена в соответствии с методом электромеханических аналогий [1]. Для данной схемы применим закон Ома: давление P эквивалентно электрическому напряжению, расход Q рабочей жидкости соответствует электрическому току, а сопротивление электрической цепи - гидравлическому сопротивлению гидросистемы $R_{\Sigma} = R_n + R_{dp}$, где R_n - гидравлическое сопротивление потерь в трубопроводе гидромагистральной; R_{dp} - гидравлическое сопротивление дросселя, регулирующего расход рабочей жидкости.

Согласно закону Ома, расход Q определяется выражением $Q = \frac{P}{R_n(1+\beta)}$, где $\beta = \frac{R_{dp}}{R_n}$.

Гидравлические сопротивления R_n , R_{dp} определяется из закона Пуазейля [2]

$$R_n = \frac{8\mu l_{\text{тр}}}{\pi(r_{\text{тр}})^4}; \quad R_{dp} = \frac{8\mu l_{dp}}{\pi(r_{dp})^4}; \quad \beta = \frac{l_{dp}}{l_{\text{тр}}} \cdot \left(\frac{r_{\text{тр}}}{r_{dp}}\right)^4,$$

где μ – динамическая вязкость рабочей жидкости; r_{mp} – радиус цилиндрического трубопровода длиной l_{mp} ; r_{dp} – радиус проходного сечения дросселя длиной l_{dp} .

Известно, что динамическая вязкость μ жидких сред зависит от температуры T и давления P [2]

$$\mu(T) = \mu_{0T} \cdot \exp(-\lambda \Delta T); \mu(P) = \mu_{0P} \cdot \exp(\alpha \Delta P),$$

где μ_{0T}, μ_{0P} – динамическая вязкость жидкости при нормированных значениях температуры T_0 и давления P_0 ; $\Delta T = (T - T_0)$ – диапазон изменения температуры T относительно нормированного значения T_0 ; ΔP – рабочий диапазон изменения давления P ; λ, α – эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-химической природы жидкости.

В дальнейшем предполагается, что компоненты имеют одинаковые значения плотности ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$), но различные значения температурных коэффициентов λ_1, λ_2 и нормированной вязкости μ_{0T1}, μ_{0T2} :

$$\mu_{0T1} = \rho(P_0, T_0) \nu_1(P_0, T_0); \mu_{0T2} = \rho(P_0, T_0) \nu_2(P_0, T_0); \mu_{0T2} / \mu_{0T1} = n,$$

где $\nu_1(P_0, T_0), \nu_2(P_0, T_0)$ – кинематические вязкости компонентов А и Б соответственно, нормированные при давлении P_0 и температуре T_0 .

Для упрощения анализа предполагается, что при нормированной температуре ($T = T_0 = const$) в рабочем диапазоне давлений ΔP динамические вязкости μ_1, μ_2 компонентов А и Б соответственно не зависят от давления P [2]:

$$\mu_1(\Delta P) = \mu_{0P1} = \mu_{0T1} = const; \mu_2(\Delta P) = \mu_{0P2} = \mu_{0T2} = n \cdot \mu_{0T1} = const.$$

В рамках принятых допущений при температуре $T = T_0$ под давлением $P = P_1$ в гидросистеме формируются расходы $Q_1(T_0)$ и $Q_2(T_0)$ компонентов А и Б соответственно

$$Q_1(T_0) = P_1 \frac{K_{zc}}{\mu_{0T1}}; Q_2(T_0) = P_1 \frac{K_{zc}}{\mu_{0T2}} = \frac{1}{n} \cdot Q_1(T_0),$$

$$\text{где } K_{zc} = K_{mp} / (1 + \beta) = const; K_{mp} = \frac{\pi(r_{mp})^4}{8l_{mp}} = const.$$

Нетрудно видеть, что, при фиксированных значениях давления ($P = P_1 = const$) и температуры ($T = T_0 = const$) отношение расходов $Q_1^{xx}(T_0) / Q_2^{xx}(T_0) = \mu_{0T2} / \mu_{0T1} = n$. Следовательно, при фиксированной температуре $T = T_1 = const$ можно уравнивать расходы $Q_1(T_1)$ и $Q_2(T_1)$ путем изменения давления P в гидросистеме.

Пусть в гидросистеме компонент А циркулирует под давлением P_1 , а компонент Б – под давлением P_2 . Тогда $Q_2(T_0) = P_2 \frac{K_{zc}}{\mu_{0T2}}$. Следовательно, $Q_1(T_0) / Q_2(T_0) = 1$ при условии $(P_2 / P_1) = n$.

При произвольном изменении температуры ($T = var$) функциональные зависимости $Q_1(T)$ и $Q_2(T)$ имеют вид

$$Q_1(T) = P_1 \frac{K_{zc}}{\mu_{0T1}} \cdot \exp(\lambda_1 \Delta T) = Q_0(T_0) \cdot \exp(\lambda_1 \Delta T) \quad (1)$$

$$Q_2(T) = P_2 \frac{K_{zc}}{n \cdot \mu_{0T2}} \cdot \exp(\lambda_2 \Delta T) = Q_0(T_0) \cdot \exp(\lambda_2 \Delta T) \quad (2)$$

где $Q_0(T_0) = K_{zc} \cdot P_1 / \mu_{0T1}$ – нормированный расход рабочей жидкости при температуре $T = T_0$ и давлении $P = P_0$.

Анализ выражений (1), (2) показывает, что отношение расходов $Q_2(T)$ и $Q_1(T)$ определяется выражением

$$\frac{Q_2^{XX}(T)}{Q_1^{XX}(T)} = \frac{P_2}{n \cdot P_1} \cdot \exp[(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \Delta T] \quad (3)$$

Из выражения (3) находится условие, при котором $Q_2(\Delta T) = Q_1(\Delta T)$ в произвольном диапазоне температур $\Delta T = (T - T_0)$

$$P_2(T) = n \cdot P_1 \cdot \exp[(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \Delta T] \quad (4)$$

В соответствии с выражениями (1)...(4), при условии $(P_2 / P_1) = n = const, \lambda_1 \neq \lambda_2$ в диапазоне температур $\Delta T = T - T_0$ расходы $Q_1(\Delta T)$ и $Q_2(\Delta T)$ уравниваются только в одной точке – при нормированной температуре $T = T_0$: $Q_1(T_0) = Q_2(T_0) = Q_0(T_0)$. Если уравнивающее давление $P_2(T)$ изменяется по экспоненциальному закону в соответствии с выражением (4), то расходы Q_1, Q_2 совпадают в заданном диапазоне температур ΔT . Исследование температурной зависимости расходов компонентов А и Б проведено при следующих значениях параметров:

$$T_0 = 20^\circ \text{C}; \nu_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}; P_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; r_{mp} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; l_{mp} = 1,5 \text{ м}; r_{dp} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}; l_{dp} = 10^{-2} \text{ м}; \beta = 1,707;$$

$$K_{mp} = 2,12 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3; K_{zc} = 7,835 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3; n = 1,5; \mu_{0T1} = 2,685 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_{0T2} = 4,0275 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}; \lambda_1 = 0,02(^{\circ}\text{C})^{-1};$$

$$\lambda_2 = 0,03(^{\circ}\text{C})^{-1}.$$

Температурные зависимости расходов компонентов $Q_{1,2} = \varphi(T)$ получены в квазистатическом режиме (при постоянном давлении $P_2 = n \cdot P_1 = const$) и в динамическом режиме – при изменении давления $P_2(T)$ по экспоненциальному закону в соответствии с выражением (4). Результаты исследования представлены на рисунке 2. Из приведенных результатов следует, что при $\lambda_1 < \lambda_2$ в статическом режиме уравнивающего давления P_2 при отклонении температуры от нормированного значения $T_0 = 20^\circ \text{C}$ соотношение расходов компонентов А и Б нарушается: при изменении температуры в диапазоне $20...45^\circ \text{C}$ расход Q_1 компонента А с меньшей вязкостью возрастает медленнее, чем расход Q_2 компонента Б с большей вязкостью; в диапазоне температур $-10^\circ \text{C}...+20^\circ \text{C}$ расход Q_2 уменьшается быстрее, чем расход Q_1 .

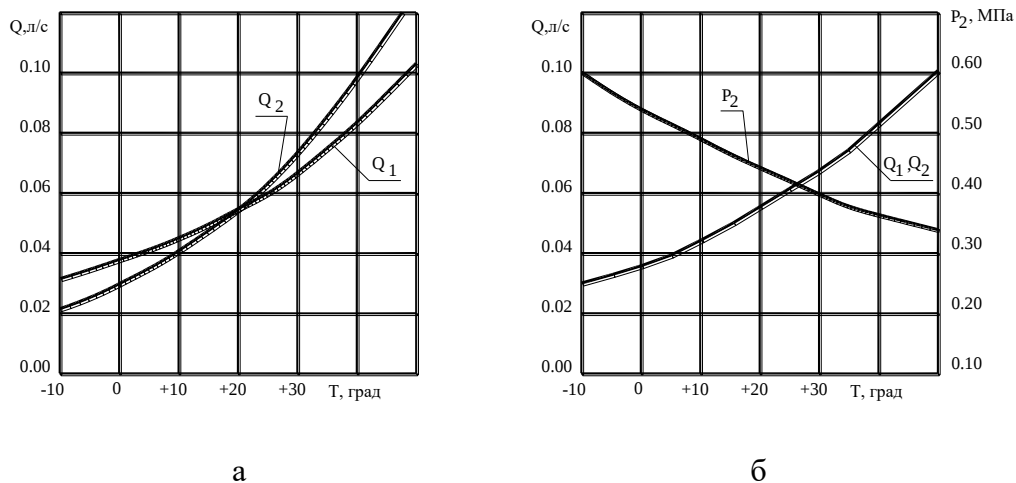


Рисунок 2. Температурная зависимость расхода компонентов (а – в статическом, б – динамическом режимах уравнивающего давления)

Таким образом, в зависимости от температуры, автоматизированная система определяет необходимые значения давлений в емкостях для обеспечения требуемых расходов компонентов.

Список литературы

1. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983 – 320 с.
2. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982 – 423с.
3. Bogutsky V.B. Analysis of existing approaches for describing the parameters of single sections during grinding / Bogutsky V.B., Shron L.B., Yagyayev E.E. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Scientific Practical Conference Materials Science, Shape-Generating Technologies and Equipment 2021, ICMSTE 2021" 2021. С. 012026.
4. Rybalkin E. Three-dimensional integro-differential model of unstationary hydrodynamic process in a liquid-metal pool of underwater arc welding / Rybalkin E., Yagyaev E., Bogutsky V., Shron L. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 2131. № 2. С. 022027.

УДК 621.787.6.004

ИНТЕГРАЦИЯ ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ В АДДИТИВНЫЙ СИНТЕЗ НА ОСНОВЕ WAAM-ТЕХНОЛОГИИ

*А.В. Киричек¹,
Д.Л. Соловьев²,
С.В. Баринов²,
С.О. Федонина¹*

¹ ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, Россия

² ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет», г. Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена разработке гибридных аддитивных технологий, сочетающих Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) с волновым деформационным упрочнением (ВДУ), для повышения механических свойств синтезируемых изделий. Показано, что WAAM обеспечивает создание сложнопрофильных деталей с экономией материала до 80-90%, однако её внедрение ограничивается микропористостью и неоднородностью структуры. Комбинирование WAAM с ВДУ позволяет устранить дефекты: глубина упрочнения достигает 6-10 мм, а микротвёрдость – 6500 МПа. Эксперименты на жаропрочном сплаве ЭИ868 подтвердили измельчение дендритов с 800 мкм до 8-25 мкм, повышение твёрдости в 2,5 раза и предела текучести в 2 раза. Моделирование в ANSYS выявило возможность оптимизации параметров синтеза и упрочнения.

Ключевые слова: аддитивные технологии, WAAM, волновое деформационное упрочнение, гибридные методы, термомеханическая обработка, моделирование.

INTEGRATION OF WAVE DEFORMATION HARDENING INTO ADDITIVE MANUFACTURING BASED ON WAAM TECHNOLOGY

**A.V. Kirichek¹,
D.L. Soloviev²,
S.V. Barinov²,
S.O. Fedonina¹**

¹ *Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia*

² *Vladimir State University, Vladimir, Russia*

ABSTRACT

The article focuses on the development of hybrid additive technologies combining Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with wave deformation hardening (WDH) to enhance the mechanical properties of synthesized components. It is shown that WAAM enables the production of complex-shaped parts with material savings of up to 80-90%, but its application is limited by microporosity and structural heterogeneity. Integrating WAAM with WDH eliminates defects: hardening depth reaches 6-10 mm, and microhardness increases to 6500 MPa. Experiments on the heat-resistant alloy EI868 confirmed the refinement of dendrites from 800 μm to 8-25 μm , a 2.5-fold increase in hardness, and a 2-fold increase in yield strength. ANSYS modeling demonstrated the possibility of optimizing synthesis and hardening parameters. The technology shows promise for aerospace applications but requires the development of interdisciplinary models.

Keywords: additive manufacturing, WAAM, wave deformation hardening, hybrid methods, thermomechanical processing, modeling.

Современное машиностроение активно внедряет аддитивные технологии (АТ) обработки металлов, трансформируя подходы к созданию деталей за счет послойного синтеза, что кардинально отличает их от традиционных методов, таких как литье или механическая обработка. Эти решения особенно востребованы в авиации, энергетике, автомобилестроении и биомедицине, поскольку позволяют производить компоненты со сложными геометрическими формами — тонкостенными элементами и облегченными конструкциями, оптимизированными под эксплуатационные нагрузки. В отличие от классических технологий, приводящих к потерям до 80-90% материала, АТ минимизируют отходы, сокращают потребность в специализированной оснастке и уменьшают экологический след, одновременно повышая гибкость производства за счет быстрой адаптации к изменениям в проектировании. Одним из перспективных направлений является технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), объединяющая принципы дуговой сварки и 3D-печати: электрическая дуга плавит металлическую проволоку, которая послойно осаждается на подложку, формируя изделие с высокой точностью [1]. Преимущества WAAM включают повышенную производительность (в 5-8 раз быстрее лазерных систем), экономическую выгоду за счет использования проволоки вместо дорогостоящих порошков, а также возможность создания крупногабаритных деталей весом до нескольких тонн, что недостижимо для традиционных методов [2-4]. Данная технология открывает новые перспективы в тяжелой промышленности и судостроении, позволяя изготавливать элементы с топологически оптимизированными структурами и внутренними полостями, что подтверждается актуальными исследованиями в области аддитивного производства.

Несмотря на перспективность WAAM-технологии, ее массовое внедрение ограничивается рядом технических вызовов, среди которых ключевым остается обеспечение

стабильной прочности изделий. Специфика послойного синтеза провоцирует неоднородность механических характеристик из-за микродефектов: газовые включения, температурные колебания и конденсация паров приводят к образованию внутренних микрополостей, выступающих очагами локальных перегрузок и снижающих ресурс конструкций в условиях циклических нагрузок или агрессивных сред [5]. Дополнительным фактором риска становится контроль микроструктуры — неоптимальный размер зерен (крупнее 50-100 мкм) провоцирует хрупкость и снижение усталостной прочности, тогда как мелкозернистая структура (менее 20 мкм) повышает сопротивляемость деформациям за счет блокирования дислокаций [6]. Для устранения этих недостатков применяют комбинированные методы упрочнения: термообработку, пластическую деформацию и защитные покрытия, однако последние не устраняют объемных дефектов. Например, поверхностная закалка способна увеличить твердость на 180-220% с упрочнением слоя до 5 мм, формируя сжимающие напряжения в поверхностных зонах [7,8], но ее применение ограничено риском коробления геометрии детали. Это делает невозможным локальное усиление критических участков и вынуждает проводить обработку только готовых изделий, что усложняет интеграцию технологии в производственные цепочки, требующие высокой точности размеров.

Для повышения эксплуатационных характеристик аддитивно синтезированных материалов активно применяется горячее изостатическое прессование (ГИП), где сочетание температурного воздействия и высокого давления в среде инертного газа (аргон) обеспечивает устранение внутренних дефектов — пор, микротрещин и структурных неоднородностей [9]. Этот метод способствует формированию равномерной мелкозернистой микроструктуры, улучшая баланс прочности и пластичности, однако его распространение ограничивается дорогостоящим оборудованием и длительностью циклов. Альтернативой выступает поверхностное пластическое деформирование (ППД), обеспечивающее локальное упрочнение за счет генерации сжимающих напряжений в поверхностном слое (глубиной 0,1-2 мм) — критически важное для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок. Несмотря на низкую энергоемкость и высокую скорость обработки, ППД сталкивается с технологическими барьерами, такими как сложная геометрия аддитивных изделий затрудняет равномерное воздействие, а толщина стенок (менее 3-5 мм) исключает применение высоких деформирующих усилий. Более того, ограниченная глубина упрочненного слоя (менее 5% от общей толщины) сужает область применения метода, как в процессе синтеза, так и на постобработочных этапах, что особенно критично для тонкостенных конструкций в аэрокосмической и медицинской отраслях.

Разработка гибридных методов, объединяющих WAAM-синтез с пластическим деформированием, долгое время сдерживалась техническими сложностями, связанными с возможной потерей эффекта наклёпа при последующем термическом воздействии. Однако исследования [10] продемонстрировали, что последовательное применение ППД до термообработки, а также комбинация высоко- и низкотемпературной термомеханической обработки, активируют «эффект технологического наследования» — сохранение деформационных изменений в микроструктуре даже после нагрева. Практическое подтверждение этой концепции было получено еще в 2007 году с патентованием метода послойного упрочнения WAAM-изделий прокаткой и чеканкой [11]. Например, холодная прокатка (нагрузка 50 кН) мартенситно-стареющей стали после аддитивного синтеза повысила её прочность с 1410 до 1750 МПа, приблизив показатель к уровню кованных аналогов (1760 МПа) [12]. Другой эксперимент с чеканкой сплава АМг5 пневмомолотом (энергия удара 7,1 Дж, частота 3200 ударов/мин) в течение 60 секунд увеличил предел прочности на 20%, предел текучести — на 15%, а относительное удлинение — на 20% по сравнению с неупрочнёнными образцами [13]. Эти результаты опровергают прежние ограничения, доказывая, что

совмещение аддитивного синтеза с деформационным воздействием не только сохраняет, но и усиливает эксплуатационные характеристики, открывая путь к созданию высоконагруженных конструкций для аэрокосмической и транспортной отраслей. Полученные результаты демонстрируют, что совмещение пластического деформирования с послойным синтезом в 3DMP-технологии способствует снижению внутренних дефектов, повышению однородности структуры и улучшению механических характеристик изделий. Однако даже при таких преимуществах методы упрочнения обеспечивают ограниченную глубину модифицированного слоя, зона с максимально улучшенными свойствами обычно не превышает трети от общей толщины упрочненного участка, что существенно снижает эффективность технологии для деталей, требующих сквозного изменения микроструктуры.

Наибольший потенциал по управлению характеристиками поверхностного слоя обеспечивает волновое деформационное упрочнение (ВДУ), реализуемое в рамках статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (СИО ППД) [14]. В основе метода лежит использование генератора импульсов, состоящего из ударной системы «бойка–волновод». При ударе бойка волновод передаёт деформационную волну в зону контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью: часть энергии волны поглощается материалом, а другая отражается и возвращается через ударную систему к месту контакта, создавая дополнительное воздействие [15]. Этот процесс повторяется до полного затухания колебаний, формируя пролонгированный ударный импульс, объединяющий прямые и отраженные волны. Ключевым условием эффективной передачи энергии является сохранение жёсткого контакта между элементами системы (бойка–волновод–инструмент–поверхность) на протяжении времени, превышающего длительность импульса. Это достигается статическим прижимом генератора к упрочняемой детали. В результате в зоне деформации создаётся комбинированный импульс, состоящий из головной (основной) и хвостовой (отраженной) частей, что обеспечивает максимальную передачу энергии удара в материал, повышая степень упрочнения.

Ключевым достоинством ВДУ выступает способность настройки параметров ударных импульсов в соответствии с характеристиками обрабатываемого материала, что повышает энергоэффективность метода и расширяет спектр его применения. Суммарное воздействие на локальную зону формируется за счёт наложения прямых и отражённых деформационных волн, создающих интерференционные эффекты. Многократное возникновение комбинированных напряжённых состояний приводит к структурным изменениям не только на поверхности, но и в глубоких слоях материала (до 6-10 мм), достигая микротвёрдости 6500 МПа. Возможность управления энергетическими параметрами ВДУ обеспечивает точечное воздействие на участки поверхности размером от микроскопических зон (1-2 мм) до крупных сегментов (50 мм), повышая адаптивность технологии к разнообразным производственным задачам. Это делает ВДУ особенно актуальным для аддитивного производства, где требуется избирательное упрочнение отдельных слоёв или периодических элементов конструкции без нарушения геометрии изделия.

Гибридная WAAM-технология с периодическим волновым деформационным упрочнением (ВДУ) реализуется поэтапным чередованием аддитивного синтеза и обработки наплавленных слоев. На первом этапе на подложку, выполненную из материала, аналогичного составу детали, наносится один или несколько слоев. Затем поверхность подвергается пластическому деформированию с помощью инструмента со сферическим, профилированным или роликовым рабочим элементом, закрепленного на цилиндрическом волноводе. Инструмент статически прижимается к поверхности, после чего боек, расположенный на противоположном конце волновода, генерирует ударные импульсы заданной энергии и частоты. Обработка

осуществляется при взаимном перемещении заготовки и инструмента, после чего на модифицированный слой наносится следующий аддитивный слой.

Упрочнение осуществляется на частично охлаждённом синтезированном материале, который в данном состоянии обладает повышенной пластичностью по сравнению с его характеристиками при комнатной температуре. Формирование микроструктуры определяется комбинацией факторов: давлением в зоне контакта, температурными режимами ВДУ, скоростью охлаждения обрабатываемого объема, а также тепловым воздействием при синтезе последующих слоев. Это придает процессу выраженный термомеханический характер, требующий комплексного анализа температурных полей, моделирования циклов нагрева-охлаждения и прогнозирования тепловых деформаций как для отдельных слоев, так и для готовой конструкции. Разработка гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ невозможна без детального изучения тепловых режимов, прогнозирования температурных полей и анализа динамики нагрева-охлаждения как отдельных синтезируемых слоёв, так и готовой конструкции в целом.

Сложность гибридной WAAM-ВДУ обусловлена многофакторностью процессов, требующих одновременного управления параметрами синтеза и упрочнения. Трудности возникают как при расчете температурных полей, так и при определении допустимых режимов обработки, что делает разработку универсальной модели процесса критически важной. Однако создание такой модели осложняется необходимостью постоянного обмена данными между программными модулями на каждом этапе (последовательно или циклически). Особую проблему представляет синхронизация информации при переходе между аддитивным синтезом и деформационным упрочнением, особенно учитывая принципиальное различие физических механизмов их воздействия на материал. Используемые для моделирования специализированные CAE-платформы (ANSYS, COMSOL, ABAQUS) [16,17], хотя и позволяют анализировать нелинейные динамические процессы в неупругих средах методом конечных элементов, часто теряют часть данных на стыке технологических операций.

Сходство WAAM-процесса с технологией многопроходной сварки позволяет использовать аналогичные подходы к моделированию. Существующие математические модели электродуговой сварки условно разделяются на три категории: модели дугового воздействия (распределение тепла, электромагнитные явления); модели переноса материала (формирование сварочной ванны, динамика расплава); комплексные модели, объединяющие процессы первых двух групп, а также дополнительные факторы, такие как остаточные напряжения и термомодеформации после кристаллизации шва.

Изучение существующих подходов показало, что на данный момент нет единого решения для разработки моделей, которые одновременно описывают процессы наплавки материала и его последующей обработки. Существующие модели созданы в узкоспециализированном ПО, не адаптированном для моделирования разнородных физических воздействий. Основным инструментом моделирования сварки и WAAM-синтеза остаётся метод конечных элементов [16, 17], применяемый в CAE-системах (ANSYS, COMSOL, ABAQUS), которые способны анализировать нелинейные быстротечные процессы в неупругих средах.

Для создания модели гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ целесообразно воспользоваться пакетом ANSYS, который имеет независимые модули, один из которых позволяет создать модель процесса WAAM-синтеза, а другой – процесса ВДУ. Для создания модели в ANSYS использовались модули Transient Thermal и Transient. ANSYS позволяет осуществлять обмен данными между модулями без потери информации, что делает систему в целом пригодной для разработки единой модели гибридного процесса. Это позволяет объединить моделирование аддитивного формирования слоёв и динамики упрочнения в

единую систему. В рамках исследования была создана конечно-элементная модель, учитывающая влияние ключевых параметров на тепловые потоки: режимы наплавки (сила тока, напряжение), условия охлаждения (естественное/принудительное), геометрию изделия и температуру окружающей среды. Особое внимание уделено разработке модели материала, где пластичность и прочность корректируются в зависимости от температурных режимов обработки [18].

На примере цилиндрической оболочки из 18 слоёв (рис 1) продемонстрирована динамика температурных полей при варьировании параметров: скорость перемещения сварочной ванны; теплопроводность (α); интервалы охлаждения между слоями; объём элементарной ячейки. Результаты моделирования [19] позволили определить зоны рекристаллизации, оптимальное время температурной выдержки и скорректировать параметры ВДУ (энергию и частоту ударов, скорость подачи инструмента). Полученные данные легли в основу экспериментальных исследований, направленных на минимизацию дефектов и повышение однородности структуры гибридных изделий.

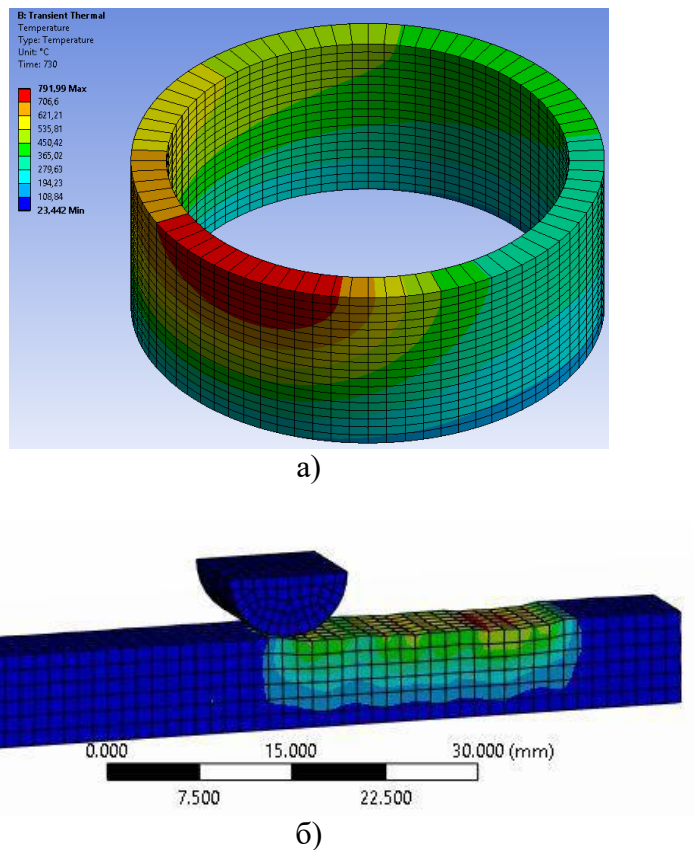


Рисунок 1. Моделирование гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ:

а - распределение температур при синтезе «оболочки» из 18 слоёв после 10 секунд охлаждения (цветовая шкала отображает температуру в °C); б - процесс ВДУ нескольких синтезированных слоёв при температуре +300°C

Новизна предложенной модели гибридного процесса WAAM-синтеза с ВДУ заключается в синхронизированном решении тепловых и механических задач в трёхмерном пространстве с учётом естественной динамики тепловых потоков в изделии. Данный подход, адаптированный для послойного синтеза из проволоки с циклическим упрочнением, может

быть распространён на широкий спектр аддитивных технологий, комбинирующих формирование слоёв с последующей или промежуточной обработкой.

Экспериментальная апробация ВДУ выполнена на образцах из жаропрочного сплава ЭИ868, используемого в производстве турбинных лопаток и элементов двигателей, эксплуатируемых при температурах до $+1000^{\circ}\text{C}$. На специализированной установке, реализующей гибридный WAAM-синтез с ВДУ, были изготовлены цилиндрические оболочки – как с упрочнением, так и без него [20].

Металлографический анализ образцов выявил, что поперечное сечение неупрочнённого образца из сплава ЭИ868 (перпендикулярное оси вращения) характеризуется дендритной микроструктурой (рисунок 2). Дендриты обладают длиной свыше 800 мкм и слабо развитыми вторичными осями, распределёнными в матрице материала. После применения ВДУ размер дендритов сократился более чем в 10 раз, а в матрице равномерно распределились частицы длиной 8–25 мкм. Упрочнение также привело к формированию гетерогенной микроструктуры, состоящей из твёрдых фаз, интегрированных в пластичную матрицу, что способствует повышению эксплуатационных свойств материала.

Механические испытания образцов (разрыв — по ГОСТ 1497-84, ударная вязкость — по ГОСТ 9454-78) подтвердили эффект упрочнения. Применение ВДУ увеличило твёрдость по Роквеллу в 2,5 раза, предел прочности — в 1,5 раза, предел текучести — в 2 раза при сокращении относительного удлинения в 3 раза. Ударная вязкость сохранилась на высоком уровне, что подтверждает баланс прочности и пластичности (рис. 3).

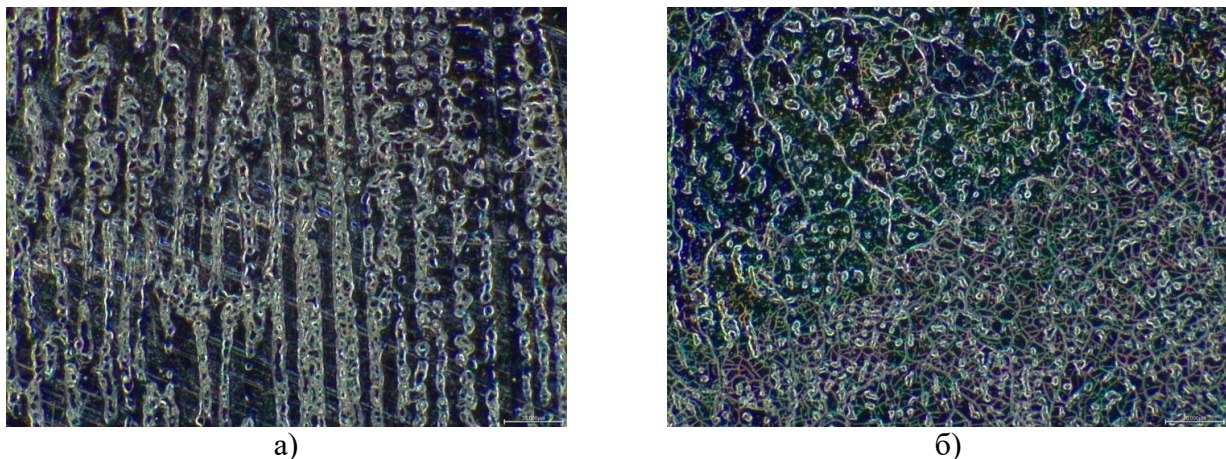


Рисунок 2. Микроструктура (x1500) синтезированного образца (сплав ЭИ868): а – без упрочнения; б – с ВДУ

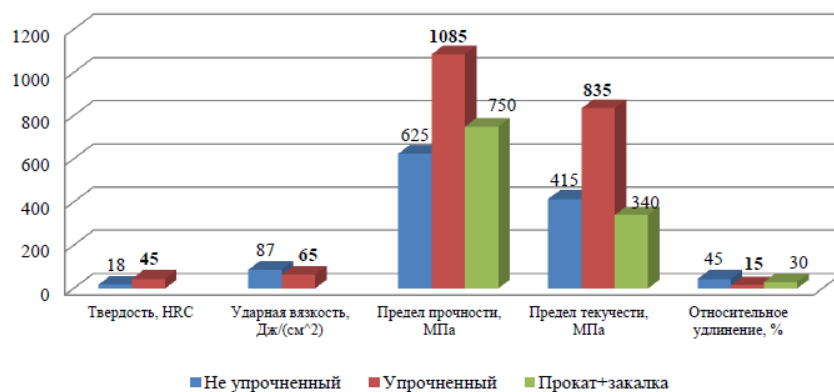


Рисунок 3. Влияние ВДУ на механические свойства синтезированного образца (ЭИ868)

Выводы:

1. Установлено, что аддитивные технологии, включая WAAM, обеспечивают создание сложнопрофильных деталей с минимальными отходами (до 80-90% экономии материала) и гибкостью проектирования, но сталкиваются с проблемой неоднородности механических свойств из-за микропористости и крупнозернистой структуры.

2. Установлено, что комбинирование WAAM с методами упрочнения (ГИП, ППД, ВДУ) устраняет структурные дефекты, при этом ВДУ обеспечивает глубину упрочнения до 6–10 мм и повышает микротвёрдость до 6500 МПа, а гибридные методы демонстрируют совместное усиление эффектов, увеличивая предел прочности на 20–50% при сохранении ударной вязкости.

3. Установлено, что применение гибридной технологии WAAM-ВДУ жаропрочного сплава ЭИ868 способствует уменьшению в нём размеров дендритов с 800 мкм до 8–25 мкм, росту твёрдости в 2,5 раза и двукратному увеличению предела текучести, и формированию гетерогенной микроструктуры.

4. Установлено, что моделирование гибридного процесса в ANSYS с использованием конечно-элементного анализа позволяет оптимизировать параметры синтеза и упрочнения, но требует разработки единой модели, учитывающей взаимовлияние тепловых и механических факторов в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термореформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Список литературы

1. Tomar B., Shiva S., Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials Today Communications. 2022. Vol. 31. Art. no. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.

2. Трубащевский Д. С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. Воронеж: Умное Производство, 2021. 203 с.

3. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. Art. no. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

4. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. Art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

5. Kou S. Welding Metallurgy. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 461 p. DOI: 10.1002/0471434027.

6. Langelandsvik G., Akselsen O. M., Furu T., Roven H. J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing // Materials. 2021. Vol. 14. No. 18. P. 5370. DOI: 10.3390/ma14185370.

7. Головин Г. Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. Л.: Машиностроение, 1973. 144 с.
8. Михлюк А. И. Новый подход к объемно-поверхностной закалке тяжело нагруженных зубчатых деталей мобильных машин // *Литье и металлургия*. 2010. № 1, 2 (54, 55).
9. Береснев А. Г., Разумовский И. М. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства // *Аддитивные технологии*. 2017. № 4. С. 50–54.
10. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Федонина С. О. Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно-термически упрочненных сталей // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2019. № 8 (98). С. 25–28. DOI: 10.30987/article_5d2635cb4d7804.69744207.
11. US 20070122560 A1. Solid-free-form Fabrication Process Including In-process Component Deformation. 2007.
12. Xu X., Ganguly S., Ding J., Dirisu P., Martina F., Liu X., Williams S. W. Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 747. P. 111–118. DOI: 10.1016/j.msea.2018.12.114.
13. Карташев М. Ф., Пермяков Г. Л., Трушников Д. Н., Миндибаев М. Р. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. № 3. С. 38–45.
14. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Лазуткин А. Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
15. Kirichek A. V., Soloviev D. L., Altuhov A. Yu. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2014. Vol. 6. No. 3. Art. 03069.
16. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 294. Art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.
17. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
18. Киричек А. В., Баринов С. В., Яшин А. В., Федонина С. О., Андросов К. Ю. Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP) // *Тракторы и сельхозмашины*. 2024. Т. 91. № 6. С. 611–618. DOI: 10.17816/0321-4443-637300.
19. Киричек А. В., Баринов С. В., Греченева А. В. Расчет температурных полей на основе конечно-элементной модели процесса аддитивного синтеза изделия // *Прикладная информатика*. 2024. Т. 19. № 6. С. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.
20. Федонина С. О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термомеханическим упрочнением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Брянск, 2021. – 154 с.

УДК 678.8

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЦВЕТНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AMS

*Б.А. Репинский¹,
А.Ю. Тараховский¹*

¹Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается одна из наиболее актуальных проблем многоцветной 3D-печати - корректный анализ уровней, границ и областей заполнения моделей в слайсере. Предложена и экспериментально апробирована методика оптимизации процесса многоцветной FDM-печати на примере Bambu Lab X1 Carbon и BambuStudio, основанная на отдельной печати массивных цветных элементов. Проведен сравнительный анализ по ключевым показателям: количеству смен материала, времени печати и расходу пластика. Результаты показали, что внедрение предложенного метода позволяет существенно уменьшить число смен материала, ускорить процесс и снизить расход пластика при сохранении высокого качества готового изделия.

Ключевые слова: FDM 3D-печать, автоматическая смена филамента, многократное увеличение объёма пластика, многоцветная печать, оптимизация процесса печати, безопасность смены катушки, анализ областей заполнения, разделение цветных элементов, риск закупоривания сопла, сокращение времени и расхода пластика.

OPTIMIZATION OF MULTICOLOR AND COMBINED PRINTING USING AMS

*B.A. Repinsky¹,
A.Yu. Tarakhovskiy¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

The article addresses one of the most pressing problems in multi-color 3D printing - the accurate analysis of levels, boundaries, and filling areas in slicing software. A method for optimizing the multi-color FDM printing process is proposed and experimentally validated on the example of the Bambu Lab X1 Carbon 3D printer and Bambu Studio slicer, based on separate printing of large color elements. A comparative analysis of key metrics—material changes, printing time, and material consumption - is presented. The results show that the proposed method significantly reduces the number of material changes, speeds up the process, and lowers material usage while maintaining high-quality printed parts.

Keywords: FDM 3D printing, automatic filament change, multiple increase in plastic volume, multi-color printing, print process optimization, spool change safety, infill area analysis, color element separation, nozzle clogging risk, reduction of time and material consumption.

Введение. В области FDM 3D печати всё активнее применяются перспективные системы автоматической смены филамента, данное решение имеет множество преимуществ, таких как многократное увеличение объёма пластика в одной печати, возможность

комбинированной печати разными материалами или же разными цветами [1 - 4]. Однако в виду относительной новизны данной системы она имеет ряд неочевидных проблем и недоработок [5, 6], связанных с оптимизацией процесса печати и безопасностью при смене катушки.

Цель исследования. Целью данного исследования является разработка и экспериментальная верификация метода оптимизации многоцветной 3D-печати, направленного на минимизацию количества смен материала, сокращение времени изготовления и снижение расхода пластика за счёт корректного анализа и разделения областей заполнения и границ цветовых элементов в модели.

Основная часть. Самой распространённой проблемой на данный момент является некорректный анализ уровней и областей заполнения, а также их границы. На примере 3D принтера Bambu Lab X1 Carbon и слайсера BambuStudio [7] будет разобран пример и метод оптимизации многоцветной печати.

Исходные условия эксперимента:

- Высота слоя: 0.16мм с разглаживанием всех верхних поверхностей;
- Материал: PLA (Стоимость 1кг = 2000 рублей);
- Периметров: 2;
- Заполнение: 15% гироид.

На рисунке 1 представлена заготовка многоцветной таблички, выступающей в роли объекта печати. Согласно техническому заданию необходимо сделать чёрные буквы, синюю рамку и дно эмблемы.

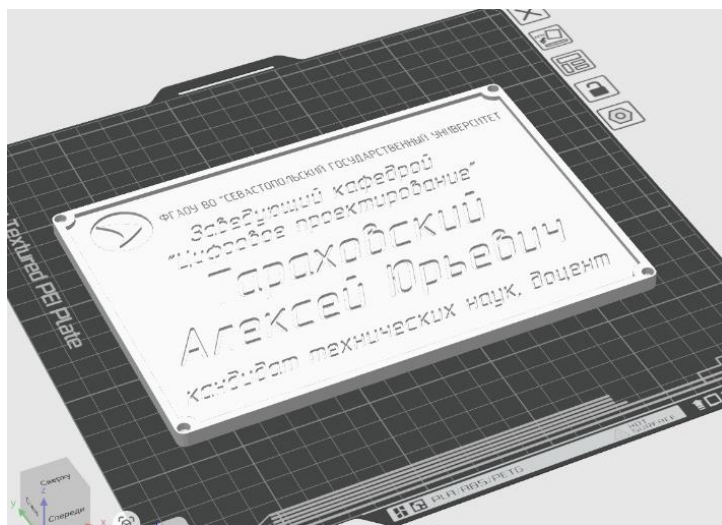


Рисунок 1. Модель таблички

Согласно официальному руководству (рисунок 2) [8] достаточно выбрать инструмент «Покраска» (1), из заранее заданных цветных прутков, или прутков, физически загруженных в AMS выбрать необходимый цвет или материал (2), выбрать способ заливки, в нашем случае заливка плоскости до граней (3) присвоить цвет плоскостям (4).

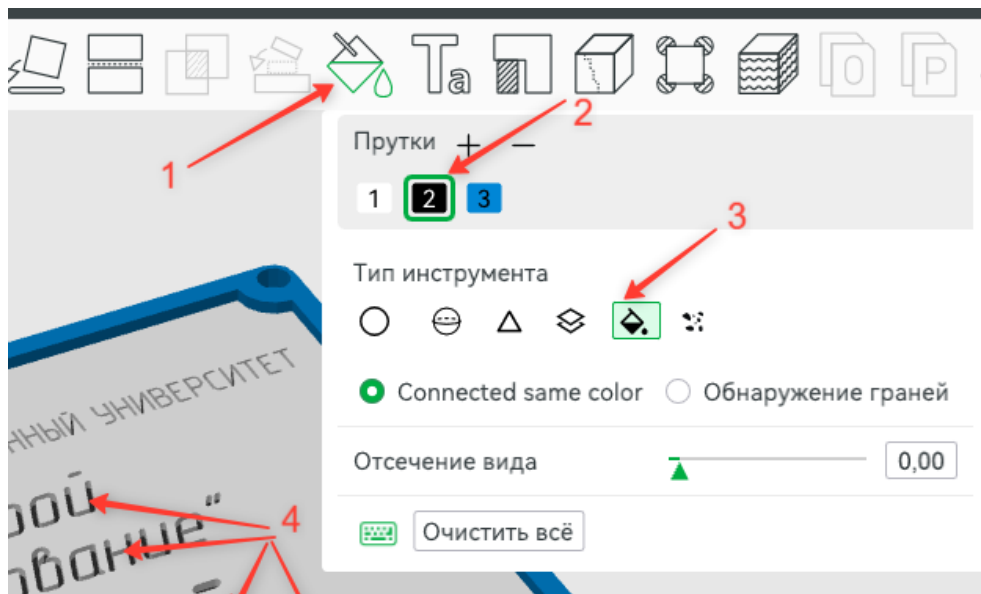


Рисунок 2. Подготовка модели

На рисунке 3 представлена окрашенная модель.

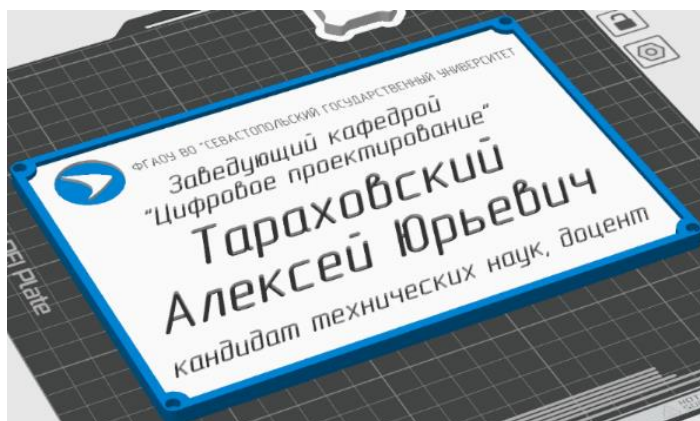


Рисунок 3. Окрашенная модель

По завершению требуется нарезать стол и в результате чего мы получаем визуально удовлетворительную пред заготовленную к печати модель (рисунок 4, а). Однако при детальном изучении обнаруживаются аномалии (рисунок 4, б), рваные края цветов, такая печать чревата забиванием сопла при постоянной смене цвета на каждом слое и плохой адгезией вследствие неровности края в случае печати разными типами пластика.

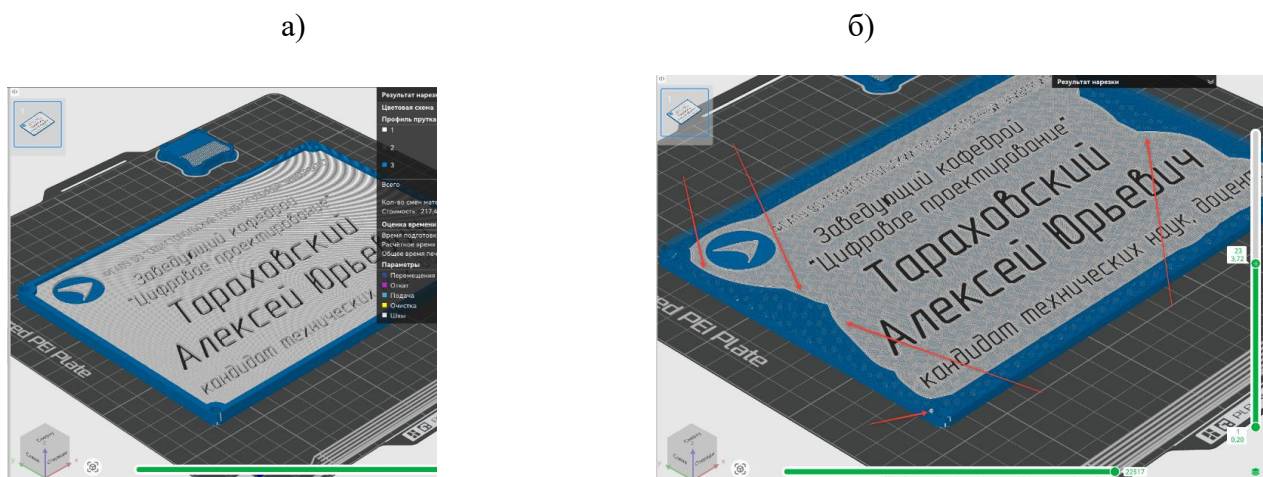


Рисунок 4. Модель, подготовленная под печать: а - нарезанная модель; б) - обнаруженные аномалии

Для предотвращения появления подобных аномалий следует отделить массивные опоясывающие элементы отличных от основного тела цветов или материалов. Во втором эксперименте синий ободок был отделён и выставлен на печать вторым столом (рисунок 5, б), в то время, как основное тело модели печаталось лишь с локальными цветными объектами (рисунок 5, а).

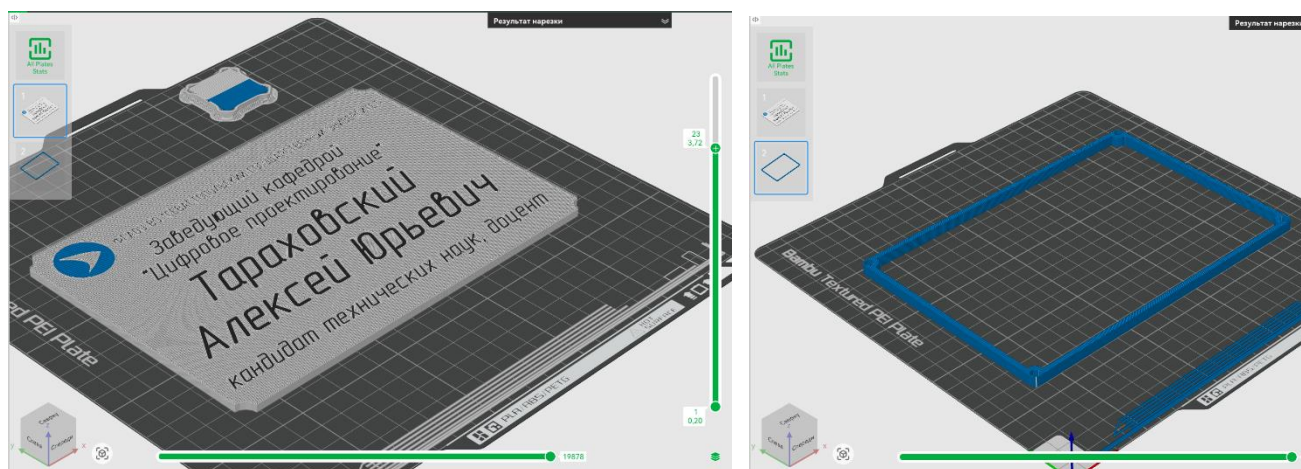


Рисунок 5. Эксперимент по разделению массивного опоясывающего элемента при печати модели с применением отдельных цветных материалов: а - печать модели с интегрированным синим ободком; б - печать модели с отделённым ободком, выполненным на втором столе.

Как мы можем видеть на рисунке 6 внутри модель нарезалась корректно, а локальные элементы не вызывают появление аномалий как на рисунке 4, б.

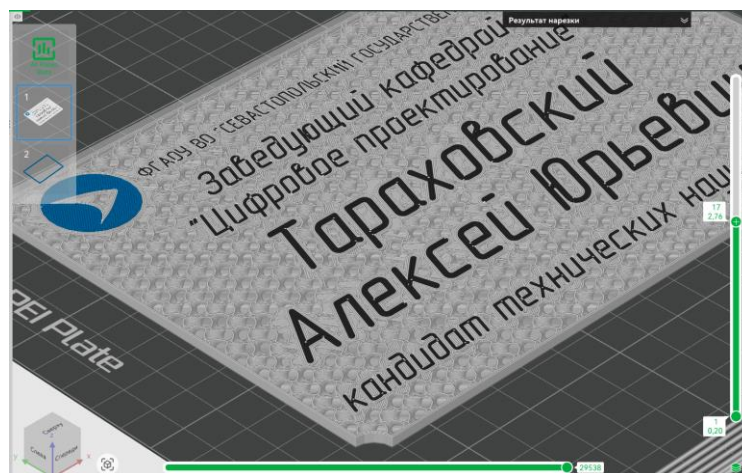


Рисунок 6. Внутренне заполнение модели при раздельной печати

Не менее важным показателем эффективности такого подхода к многоцветной печати является показатель расхода пластика, время печати и количество смен материала. На рисунке 7, а - в приведена статистика печати для обоих методов.

Результат нарезки				
Цветовая схема				
Профиль прутка				
Профиль прутка	Модел	Очистка	Башня	Всего
1	19,09 m	2,46 m	0,25 m	21,80 m
	57,84 g	7,47 g	0,76 g	66,07 g
2	1,11 m	0,19 m	0,05 m	1,35 m
	3,36 g	0,57 g	0,16 g	4,10 g
3	10,43 m	1,89 m	0,40 m	12,72 m
	31,61 g	5,72 g	1,22 g	38,55 g
Всего	30,63 m	4,54 m	0,71 m	35,87 m
	92,81 g	13,76 g	2,15 g	108,72 g
Кол-во смен материала: 27				
Стоимость: 217,44				
Оценка времени				
Время подготовки: 8m38s				
Расчётное время печати: 7h4m				
Общее время печати: 7h12m				
Параметры		Видимость		
Перемещения				
Откат				
Подача				
Очистка				
Швы				

Результат нарезки				
Цветовая схема				
Профиль прутка				
Профиль прутка	Модел	Очистка	Башня	Всего
1	26,03 m	0,73 m	0,33 m	27,08 m
	78,90 g	2,20 g	0,99 g	82,08 g
2	1,09 m	0,19 m	0,04 m	1,32 m
	3,31 g	0,57 g	0,13 g	4,01 g
3	0,15 m	0,97 m	0,08 m	1,21 m
	0,47 g	2,95 g	0,25 g	3,67 g
Всего	27,28 m	1,89 m	0,45 m	29,62 m
	82,68 g	5,73 g	1,37 g	89,77 g
Кол-во смен материала: 12				
Стоимость: 179,54				
Оценка времени				
Время подготовки: 8m38s				
Расчётное время печати: 5h42m				
Общее время печати: 5h51m				
Параметры		Видимость		
Перемещения				
Откат				
Подача				
Очистка				
Швы				

Результат нарезки		
Цветовая схема		
Профиль прутка		
Профиль прутка	Модел	
3	4,45 m	13,48 g
Кол-во смен материала: 0		
Стоимость: 26,96		
Оценка времени		
Время подготовки: 8m38s		
Расчётное время печати: 48m8s		
Общее время печати: 56m46s		
Параметры		Видимость
Перемещения		
Откат		
Подача		
Очистка		
Швы		

Рисунок 7. Сравнительная статистика печати модели: а - обычный способ, б - раздельная печать основного тела, в - раздельная печать обода.

Произведём сравнение по трём основным характеристикам [9, 10]:

- 1) Количество смен материала: Обычный метод: 27 раз, раздельный метод: 12 раз

$$\frac{(\text{Метод 1})}{(\text{Метод 2})} \times 100 = \frac{27}{12} \times 100 = 225\% \quad (1)$$

Каждая смена материала, это риск закупоривания сопла и иной аварии, связанной с AMS, при раздельной печати риск снижается более чем в два раза.

2) Время печати: при обычном методе: 7 часов 12 минут (7,2 часа в десятичной), при раздельном 5 часов 51 минута тело и 57 минут обод, суммарно 6 часов 48 минут (6,8 часа в десятичной).

$$\frac{(\text{Метод 1})}{(\text{Метод 2})} \times 100 = \frac{7,2}{6,8} \times 100 = 105,8\% \quad (2)$$

Разница обуславливается более оптимизированной траекторией движения печатной головы, смене материала и временем, связанным с этими задачами.

3) Количество расходуемого материала: Обычный метод 108.72 грамма, раздельный метод суммарно 103.25 грамм (89.77+13.48 грамм)

$$\frac{(\text{Метод 1})}{(\text{Метод 2})} \times 100 = \frac{108,72}{103,25} \times 100 = 105,3\% \quad (3)$$

Вывод. В результате проведённого исследования установлено, что оптимизация процесса многоцветной 3D-печати посредством корректного разделения массивных цветных элементов и грамотного выбора областей заполнения позволяет значительно снизить количество смен материала, уменьшить время печати и добиться более стабильного качества поверхности модели. Раздельная печать отдельных элементов способствует устранению дефектов границ цветов и снижает риск возникновения аварий, связанных с частой сменой материала. Представленные экспериментальные данные подтверждают эффективность предложенного подхода и его целесообразность для внедрения в практику многоцветной 3D-печати. Помимо решения основной задачи устранения аномалии печати, из сравнительного анализа можно сделать вывод, что в среднем эффективность возрастает на 5% а риск аварии снижается в два раза.

Список литературы

1. Габитова, А. Р. Сравнительный анализ программного обеспечения для 3D моделирования и 3D печати / А. Р. Габитова // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 2119-2123.
2. Пышкин, А. А. Аддитивные технологии в современном мире / А. А. Пышкин, Е. Г. Ковтун, А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : Сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 83-85.
3. Тараховский, А. Ю. Оптимизация выбора материалов для 3D-печати (FDM): влияние теплового расширения и механических свойств / А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 12–14 февраля 2025 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2025. – С. 49-54.
4. Ногуманов, Р. И. 3D печать и ее оптимизация / Р. И. Ногуманов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2019 : материалы X Международной научно-технической конференции, Казань, 05–06 декабря 2019 года. Том Часть 1. – Казань: Без издательства, 2019. – С. 94-96.

5. Иощенко, П. П. Многоцветная FDM-печать с использованием системы AMS: возможности и ограничения / П. П. Иощенко, Е. А. Цицюрская, А. Ю. Тараховский // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 14–17 апреля 2025 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2025. – С. 218-222.

6. Полякова, Д. А. Анализ зарубежных и отечественных исследований проблемы адаптации 3D-моделей для 3D-печати / Д. А. Полякова // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО по тематикам: экономика; менеджмент, инноватика, Санкт-Петербург, 30 января – 02 2018 года. Том 7. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – С. 249-252.

7. Bambu Lab X1 Carbon. Официальный сайт. URL: <https://bambulab.com/en/x1> (дата обращения: 20.11.2025).

Multi-color printing — Bambu Studio. Bambu Lab Wiki. URL: <https://wiki.bambulab.com/en/software/bambu-studio/multi-color-printing> (дата обращения: 20.11.2025).

8. Шиляева И.В., Плотникова Р.В. Оценка эффективности применения 3D-печати для стеновых конструкций // КиберЛенинка : научная электронная библиотека. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-primeneniya-3d-pechat-dlya-stenovykh-konstruktsiy> (дата обращения: 20.11.2025).

9. Лайша, А. К. Исследование влияния скорости печати на качество и точность изделий, изготовленных по технологии FDM 3D-печати / А. К. Лайша, Д. В. Бушманов, А. М. Пьянзин // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 105-13. – С. 219-223. – DOI 10.18411/trnio-01-2024-678.

УДК 621.7

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРЕЦИЗИОННОЙ РАЗРЕЗКЕ СЛИТКОВ НА ПЛАСТИНЫ ДИСКАМИ С ВНУТРЕННЕЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

**Н.И.Покинтелица¹,
М.И.Братан¹,
А.Е. Графова¹,
Д.А. Юрьев¹**

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Выполнен анализ исследований по прецизионной разрезке слитков на пластины дисками с внутренней режущей кромкой обоснована необходимость дальнейших исследований процесса, выявлены недостатки существующих рекомендаций, обусловленных современными требованиями рынка и появлением новых полупроводниковых и диэлектрических материалов,

существенно различающихся по своим физико-механическим характеристикам, предъявлением более жестких требований к геометрическим параметрам подложек (bow, warp, TIR, TTV)¹, и уровню технологической оснащенности операций обработки заготовок из полупроводниковых и диэлектрических материалов в электронной промышленности.

Ключевые слова: шлифование, полупроводниковые пластины, диски с внутренней режущей кромкой, режимы резки.

ANALYSIS OF RESEARCH ON PRECISION CUTTING OF INGOTS INTO PLATES WITH DISCS WITH AN INTERNAL CUTTING EDGE

N.I. Pokintelitsa¹,

M.I. Bratan¹,

A.E. Grafova¹,

D.A. Yuryev¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

An analysis of research on precision cutting of ingots into wafers using disks with an internal cutting edge was carried out, the need for further research into the process was substantiated, and the shortcomings of existing recommendations were identified, due to modern market requirements and the emergence of new semiconductor and dielectric materials that differ significantly in their physical and mechanical characteristics, the imposition of more stringent requirements on the geometric parameters of substrates (bow, warp, TIR, TTV)¹, and the level of technological equipment for processing semiconductor and dielectric material blanks in the electronics industry.

Keywords: grinding, semiconductor wafers, internal cutting-edge discs, cutting modes.

Введение. Бурное развитие современного машиностроения выдвигает задачу непрерывного поиска новых технологических решений, разработок, исследований и внедрения в производство новых высокоэффективных технологических процессов. Это в равной степени относится как к деталям и узлам основного механообрабатывающего производства, так и специальным вопросам современного машиностроения – разработке технологических процессов изготовления деталей узлов, агрегатов систем, автоматов и автоматических линий.

Одним из таких специфических проблемных вопросов является создание управляющих приборов на основе специальных полупроводниковых материалов. Объем применения пластин кремния и германия в промышленности только за последние пять лет вырос более чем в 100 раз.

К сожалению, технологические процессы алмазной резки слитков полупроводниковых материалов на пластины изучены недостаточно.

В настоящее время серьезное внимание уделяется развитию технологии машиностроения, электронного машиностроения, производству чипов для различных микропроцессоров, и других сложных интегральных схем [1...3].

Особенность современного производства таких изделий заключена в сложности и длительности технологического цикла от выращивания монокристаллического слитка до выпуска готовой продукции [4...6].

Значительное место в производстве полупроводниковых приборов занимает механическая обработка, в частности, разрезание слитка на пластины [7...10].

Точность и шероховатость поверхности заготовки при разрезании существенно влияет на производительность последующих операций и величину дополнительных затрат времени на исправление дефектов и формы пластины. Невысокая точность разрезания приводит к потере дорогостоящего материала, а необходимость введения дополнительных припусков на последующие операции чернового и чистового шлифования, их доводки и окончательного травления в свою очередь увеличивает расход материала, стоимость которого в настоящее время доходит до 150000 тысяч долларов за 1 кг [11].

Именно на операциях разрезания полупроводниковых материалов должна быть обеспечена высокая точность расположения плоскости реза с ориентацией её относительно заданной кристаллографической плоскости слитка. Поэтому процесс разрезки является одним из основных в технологическом цикле производства полупроводниковых изделий, определяющих качество и эффективность всего технологического процесса изготовления пластин [12...14].

Получение пластин, удовлетворяющих технические требования, делает весьма актуальными исследования, связанные с оценкой оборудования, для определения точности которого необходимо знать характер и степень влияния отдельных факторов, вызывающих погрешности при разрезке слитков на пластины. До настоящего времени не существует каких-либо норм точности работ оборудования, которые определялись бы однозначно. Это объясняется большим количеством факторов, влияющих на точность работы станка (геометрическая и кинематическая точность технологической системы, ее температурные деформации, технологическая жесткость, устойчивость при установке, перемещениях узла станка и при обработке, вынужденные колебания, износ инструмента).

Одним из первых исследований геометрической точности станков были исследования, выполненные Соколовским А.П., Вотиновым К.В., Корсаковым В.С. что позволило установить зависимость между неточностью станка и погрешностью обработки [16].

На основе этих работ было показано, что геометрические погрешности оборудования полностью переносятся на обрабатываемую деталь. Результаты теоретических и экспериментальных работ в указанном направлении позволили установить нормы точности металлообрабатывающих станков, утвержденных в качестве государственных стандартов [16].

Анализ вышеизложенных работ был учтен при исследовании точности изготовления оборудования и разработке практических рекомендаций по значительному уменьшению погрешностей, передаваемых деталям узлами отрезных станков.

Исследования позволяют установить связь между погрешностями относительного перемещения инструмента и заготовки на станке – с одной стороны, погрешностями формы и относительного расположения поверхности на деталях – с другой стороны. В этой области известны работы Маталина А.А. На основании проделанного анализа работ в этой области можно сделать выводы о том, что подобных исследований применительно к оборудованию для разрезки полупроводниковых материалов не существует. Вместе с тем для повышения точности реза проведение таких исследований весьма необходимы.

Существенное влияние на формирование параметров точности оказывают тепловые явления. Основными источниками тепла являются температура в зоне резания, при трении в узлах, а также поступающая из окружающей среды. В работах В.А. Сипайлова, А.В. Якимова, С.Г. Редько, дается методика определения контактной температуры посредством суммирования тепловых импульсов от отдельных абразивных зерен, что позволило установить основные закономерности тепловых полей, но в их работах не рассматривались тепловые факторы при разрезке полупроводниковых материалов.

Новоселова Ю.К., Королев А.В. в своих работах приводят расчет и моделирование температурного поля в изделии с учетом стохастического взаимодействия абразивных зерен с материалом инструмента. Они составили баланс упругих перемещений, разработали приборы для исследования жесткости станков.

Работа С.М. Братана посвящена процессам съёма припуска в хрупких материалах при стохастическом взаимодействии абразивных зерен с шероховатым поверхностным слоем заготовки.

Для обработки монокристаллов германия и кремния весьма важным является знание средней температуры отрезаемой пластины в целом и величины её на различной глубине от зоны резания. Эти процессы исследовались в работах А.В. Хандожко, что позволяет оптимизировать режимы резания с точки зрения допустимой температуры для данного материала. Следует особо отметить, что длительное воздействие температуры свыше 500 °С на монокристаллы германия и кремния нежелательно, т.к. происходит разориентировка блоков и появление поликристаллических слоев [16].

Изучению жесткости металлорежущего оборудования посвящены работы Подураева В.Н., Соколовского А.П., Вотинова К.В., Левина З.М., Решетова Д.Н. и других [16].

Б.С. Балакшин предложил повысить точность обработки с помощью включения в систему СПИД автоматического регулирования (САУ) [16].

С.М. Братан разработал теорию стохастических наблюдателей и регуляторов и реализовал ее для процессов тонкого шлифования [1...3]. Но в этих работах не рассматривались процесс резки полупроводниковых материалов.

Значительное влияние на погрешность обработки оказывает динамика станка. В этой области известны работы Кудинова В.А. [16]. Они посвящены исследованию динамики станков и введению системы показателей динамического качества станков и разработана им общая методика теоретического и экспериментального анализа качества.

Однако все тщательно проанализированные работы по исследованию динамики станков не дают необходимых рекомендаций применительно к станкам по резке полупроводниковых материалов.

Геометрическая точность отрезаемой пластины на станках определяется точностью и постоянством взаимного положения инструмента и детали в каждый момент времени.

Положение инструмента и детали определяется геометрической и динамической точностью станка, который предусматривает правильность форм и размеров направляющих суппортов, вращательного движения шпинделя и точности их относительного движения. Под динамической точностью станка понимают обеспечение параметров точности детали в процессе работы станка.

В работе Кошелевского В.Ю. [16] приведены исследования колебания шпинделя и установлено, что неуравновешенность является следствием несовпадения главной центральной оси инерции группы шпиндель-деталь с осью вращения.

При исследовании вопроса о точности реза дорогостоящих полупроводниковых материалов необходимо в первую очередь учесть влияние продольных колебаний шпинделя, происходящих за счёт усилий резания, а также за счёт поперечной силы со стороны детали.

Рассмотренные выше основные теоретические предпосылки и методические положения по анализу обработки не позволяют с достаточной достоверностью решать общие задачи по количественному определению точностных показателей и их прогнозированию для условий современного производства. Несмотря на то, что разрезание слитков полупроводникового материала широко распространено за рубежом и в России, сущность процесса мало изучена. Сведения об условиях и режимах резания, даны в справочниках для устаревшего оборудования, например, в таблице 1 [16].

В настоящее время, чтобы обеспечить требования рынка, необходимо увеличивать производительность обработки.

При форсированных технологических режимах возрастает чувствительность технологической системы (ТС) к возмущающим факторам и наблюдается потеря стабильности ТС и технологического процесса (ТП) в целом. Процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, в ходе ТП изменяются не только параметры заготовки и инструмента, но и самой ТС. Это приводит к нестабильности качества изделий и не позволяет в полной мере использовать значительные технологические возможности шлифования как финишной операции.

Необходимость дальнейших исследований еще обусловлена появлением новых полупроводниковых и диэлектрических материалов, существенно различающихся по своим физико-механическим характеристикам, непрерывное увеличение диаметра подложек, повышение плотности формирования компонентов на них предъявляют все более жесткие требования к геометрическим параметрам подложек (bow, warp, TIR, TTV)¹, а это, в свою очередь, требует постоянного повышения уровня развития техники и технологической оснащенности операций обработки заготовок из полупроводниковых и диэлектрических материалов в электронной промышленности. [17...21].

Таблица 1. Рекомендуемые режимы резки некоторых материалов алмазными кругами с внутренней режущей кромкой

Обрабатываемый материал (кристаллографические направления)	Скорость резания, м/с	Рабочая подача, мм/мин	Расход смазочно-охлаждающей жидкости, л/мин	
			На охлаждение	На очистку кромки
Кремний (111)	17–19	40–70	6–8	6–8
Кремний (100)	17–19	30–60	6–8	4–6
Германий (111)	18–20	40–70	4–6	4–6
Германий (100)	18–20	30–60	4–6	3–5
Арсенид галлия	15–17	15–20	3–5	3–5
Фосфид галлия	15–17	10–15	3–5	3–5
Арсенид индия	11–12	15–20	3–5	10–15
Сапфир (с вращением)	6–8	1–3	10–15	6–8
Гранат	14–16	6–8	10–12	10–12
Кварц	11–12	10–20	10–12	10–12
Ниобат лития	18–20	30–40	4–5	2–3
Самариевый кобальт	14–16	8–10	6–8	6–8
Феррит	16–18	15–20	2–3	2–3

Таким образом, исследование процесса прецизионного резания полупроводниковых пластин является весьма актуальной проблемой, положительное решение которой имеет большое научное и практическое значение.

Выводы. Выполненный анализ, существующий работ, позволил сделать следующие заключения:

На основе существующих теоретических и экспериментальных исследований процесса прецизионной разрезки полупроводниковых материалов невозможно выявить и основные

технологические факторы, влияющие на точность разрезания. Существующие методики расчета получаемой погрешности резки имеют ограниченную область применения и непригодны для условий современного производства.

Температурные, стойкостные и силовые зависимости при разрезании не учитывают стохастическую природу абразивной резки и изменение состояния ТС в процессе обработки с течением времени.

Для решения вышеуказанных задач необходимы конструктивные мероприятия направленные на повышение точности отрезаемых пластин, а именно, на разработку и научно обосновать рекомендаций по конструированию станочного оборудования с механизмами плавно-переменной продольной и поперечной подач, обеспечивающих высокую точность резки, производительность и стойкость режущего инструмента.

Таким образом для повышения эффективности процесса резки слитков на пластины дисками с внутренней режущей кромкой необходимо разработать новый подход к проблеме разрезания полупроводниковых слитков на пластины, основанный на использовании в целях улучшения качества обработки и резкого увеличения производительности плавно изменяющихся по определенному закону режимов резания, а также совокупность теоретических и экспериментальных исследований по указанному направлению, включая разработанные новые конструкции узлов плавно-переменной подачи.

Для этого необходимо выполнить исследования влияния технологических факторов на геометрическую точность формы отрезаемой пластины, провести теоретические исследования процесса прецизионной резки полупроводниковых материалов, разработать методики экспериментальных исследований процесса прецизионной резки.

Теоретическая часть должна отражать влияние геометрической точности оборудования на погрешность обработки процесса прецизионной резки слитков на пластины, рассчитывать и обеспечивать динамическую устойчивость процесса при резании кругом с внутренней режущей кромкой; учитывать влияния продольных и поперечных колебаний шпинделя на точность отрезаемых пластин, влияния режимных параметров на силы резания, стойкость отрезного диска и усредненную температуру в зоне резания.

Список литературы

1. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57- 70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70. – EDN FABVJD.
2. Bratan, S. New calculation methodology of the operations number of cold rolling rolls fine grinding S.Bratan, Z.Ságová, M.Sága, B.Yakimovich, I.Kuric // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 3484. – EDN: FKSDBY.
3. Братан, С. М. Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 9(135). – С. 3-9. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9. – EDN ZCQLCF.
4. Братан, С. М. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рощупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 6-16. – DOI 10.17212/1994- 6309-2021-23.2-6-16. – EDN NYYZXL.

5. Братан, С. М. Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов / Братан, С. И. Рошчупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 31-39. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-31-39. – EDN SHFFWW.

6. Хекерт, Е.В. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавающих мастерских / Е.В. Хекерт, Е.А. Владецкая, С.М. Братан, Харченко А.О. // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-4 (52). – С. 33-37. – EDN: XEPDCY.

7. Bratan S. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloy/ S. Bratan, T.Stadnik, V.Golovin //Materials Today: Proceedings. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. С. 2013-2018.

8. Bratan, S. The mathematical models of electrochemical grinding for the precision production / S. Bratan, I. Kuric, B. Yakimovich, U. Abdulgazis, D. Abdulgazis // MM Science Journal. – 2024. – Т. 2024. – № 6. – EDN: MHXDSN – DOI: 10.17973/mmsj.2024_12_2024100.

9 Братан, С. М. Повышение производительности циклов шлифования валков холодной прокатки путем оптимизации режимов графоаналитическим методом / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, А.О. Харченко, С.И. Рошчупкин // Черные металлы. – 2023. – № 12. –С.15. –EDN: JYXOPI.

10. Братан, С.М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / С.М. Братан С.М., В.И. Головин, Ю.К. Новоселов, И.А. Дымченко // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 10 (148). – С. 30-38. – EDN: ROPDFE.

11. Братан, С. М. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С. М. Братан, С. И. Рошчупкин, А. С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33-47. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47. – EDN FGQKDO.

12. Братан, С. М. Вычисление радиального съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рошчупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 31-44. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.3-31-44. – EDN OCMCPW.

13. Bratan, S. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Chasovitina // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 384-389. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384. – EDN SDIQRE.

14. Bratan, S.M. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls / Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Belousov S.V. // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Т. 22. – С. 26-31. – EDN: PWDYSB.

15. Elekert, E.V. Influence of external factors on the technological system of a high-precision machine tool in conditions of floating workshops / Elekert E.V., Vladetskaya E.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O. // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 4. – № 2 (53). – С.33.

16. Киселев, М. Г. Технология механического распиливания хрупких неметаллических материалов с вынужденными колебаниями заготовки / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная. – Минск : БНТУ, 2017 – 393 с.

17. Боран-Кешишьян, А.Л. Реакция на произвольный сигнал динамической системы виброизолирующего устройства станка в условиях плавающей мастерской / А.Л. Боран-

Кешишьян, С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 1-1 (59). – С. 81-85. – EDN: GCBWXY.

18. Владецкая, Е.А. Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.В. Хекерт // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1 (57). – С. 84-94. – EDN: VFUMYG.

19. Stadnik, T. Effect of process modes on tangential component of cutting force during belt rotary grinding of aluminium alloy blanks D 16 / Stadnik T., Sidorov D., Novikov P., Temindarov I. В сборнике: Materials Research Proceedings. Сер. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment" 2022. – С. 466-472. – EDN: DFDVYT.

20. Братан, С. М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / Братан С.М., Головин В.И., Новоселов Ю.К., Дымченко И.А. Научные технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 30-38.

21. Bratan, S. Investigation of the mechanism of interaction of cutting fluids with the material of the workpiece when grinding titanium parts in the presence of inorganic salt / S. Bratan, T. Stadnik, S. Roshchupkin // Materials Today: Proceedings. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. – С. 2048-2051.

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.3.038.825.7

К ВОПРОСУ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНА НАНОЧАСТИЦАМИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

В.М. Гавриш¹,

Ю.О. Шагова¹,

Т.А. Паничкин¹

¹ФГОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Полиэтилен один из самых востребованных и широко используемых синтетических материалов на рынке полимеров. Ранее в работе авторов был рассмотрен вариант применения нанопорошков для полиэтилена высокого давления, с целью увеличения износостойкости [1]. В дополнение к предыдущим исследованиям, авторы рассмотрели возможность использования наночастиц вольфрамсодержащих соединений для полиэтилена низкого давления.

В работе представлены исследования по улучшению износостойкости полиэтилена низкого давления путем добавления вольфрамсодержащих наночастиц, таких как WC, WO₃, ТТК (карбид титана, тантала и вольфрама).

Ключевые слова: износостойкость, ПЭТ, наночастицы, вольфрамсодержащие соединения.

ON THE ISSUE OF MODIFICATION OF HIGH-PRESSURE POLYETHYLENE BY NANOPARTICLES OF TUNGSTEN-CONTAINING COMPOUNDS

V.M. Gavrish¹,
J.O. Shagova¹,
T.A. Panichkin¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

Polyethylene is one of the most demanded and widely used synthetic materials in the polymer market. Earlier, the authors considered the use of nanopowders for high-pressure polyethylene in order to increase wear resistance [1]. In addition to previous studies, the authors considered the possibility of using nanoparticles of tungsten-containing compounds for low-pressure polyethylene.

The paper presents studies on improving the wear resistance of low-pressure polyethylene by adding tungsten-containing nanoparticles such as WC, WO₃, and TTK (titanium, tantalum and tungsten carbide).

Keywords: wear resistance, PET, nanoparticles, tungsten-containing compounds.

Актуальность. Рынок полиэтилена - весьма динамичная отрасль производства, ключевым фактором является растущий спрос на полиэтиленовые продукты различных отраслей промышленности, благодаря его универсальным свойствам: высокой твердости, водонепроницаемости, долговечности, теплостойкости и возможности проведения рециклинга. Полиэтилен широко используется в сельском хозяйстве, медицине, строительстве, электротехнике и электронике.

Мировой объем рынка полиэтилена в 2023 г. оценочно составил 113 млн т. произведенной продукции. Объем рынка ежегодно увеличивается, с 2015 г. рынок вырос на 21,72%. В среднем до 2030 г. ожидается ежегодный рост рынка на 4,18% [2].

На сегодняшний день существует несколько вариаций повышения износостойкости полиэтилена: введение наполнителей [3], использование ингибиторов растрескивания [4, 5], модификация самой структуры [6], облучение заряженными частицами [7].

Ряд научных работ, посвященных вопросу повышения износостойкости к истиранию полиэтилена, свидетельствует о том, что перспективным методом является использование наночастиц различных соединений. Таким образом можно выделить следующие исследования:

1. Модифицирование полимеров нанодисперсными керамическими частицами [8].

В работе приведены результаты исследований применимости нанодисперсных керамических порошков на свойства нанокомпозитов, изготовленных на основе полиэтилена высокого давления. Исследования показали, что добавление нанодисперсных модификаторов SiC, TiO₂ приводит к измельчению зерна полиэтилена, при этом наблюдается увеличение плотности и износостойкости полиэтилена.

2. Исследование износостойкости линейного полиэтилена, содержащего дисульфид молибдена различной степени дисперсности [9].

Приведены результаты исследования возможности использования дисульфида молибдена различной степени дисперсности в качестве модификатора для улучшения износостойкости. Установлено, что добавление дисульфида молибдена в наноформе значительно повышает (на порядок) износостойкость линейного полиэтилена.

3. Модификация PEI наночастицами титана в присутствии коротких углеродных волокон (SCF), а также хлопьев графита [10].

В ходе исследования было установлено, что SCFS и графитовые хлопья значительно улучшают износостойкость. Кроме этого, добавление наночастиц TiO_2 снизило коэффициент трения и температуру контакта композитов, особенно в условиях высокой фотоэлектрической нагрузки.

В научно-образовательном центре «Перспективные технологии и материалы» Севастопольского Государственного Университета, был проведен ряд исследований о влиянии наноразмерных вольфрамсодержащих порошков на износостойкость полиэтилена низкого давления.

Проведение эксперимента по определению абразивного износа материала проводилось согласно ГОСТ 11012 – 2017 [11], на универсальной машине трибометр МТ393. Эксперимент проводился по методу пара трения «штифт – плоскость», где штифт - это цилиндрический образец из ПЭТ, а в качестве плоскости выступает шлифовальная шкурка шероховатостью Р150.

Первым этапом в подготовке образцов для проведения испытаний было очищение поверхности от облоя, который остается после литья, шлифовка торцевых поверхностей. Затем образцы маркировались и взвешивались на электронных весах. Далее в установочные места специальной оснастки устанавливались и закреплялись 3 стандартных образца. Оснастка крепилась к шпинделю машины трения. Шпиндель приводился во вращение с частотой 150 оборотов в минуту, что соответствует линейной скорости движения образца 330 мм/с. Стол машины трения вместе с закрепленной на ней шлифовальной шкуркой поднимался и прижимал шлифовальную шкурку к поверхности образцов закреплённых на шпинделе машины трения. Стол создавал регулируемую нагрузку 45 Н. Шлифовальная шкурка, закрепленная на столе трибометра, автоматически перемещалась в плоскости перпендикулярной оси вращающихся образцов, для обновления режущих абразивных зерен, вступающих в контакт с образцами.

Конечным этапом в подготовке образцов была притирка на машине трения на дистанции истирания 10 м. Этот этап был реализован для создания одинаковых параметров шероховатости и прямолинейности торцевой поверхности образцов.

Эксперименты проводились на дистанции истирания в 50 метров. Для каждого процесса истирания использовалась новая шлифовальная шкурка зернистостью Р150, производитель компания KUDIS. После каждого процесса истирания образцы извлекались и проходили процедуру контрольного взвешивания.

Согласно ГОСТ 11012 – 2017 [10], за показатель истирания образца пластмассы принимают величину уменьшения его объема, мм^3 на 1 м пути истирания.

Для определения плотности материала образцы взвешивались, после чего показатель массы делился на объём образцов для определения плотности материала (таблица 1).

Таблица 1. Плотности образцов полиэтилена низкого давления

Материал	Модификатор к массе основы	Плотность, г/см^3
ПНД	-	0,95
ПНД	WC 1%	1,10
ПНД	WC 2%	1,25
ПНД	WC 3%	1,36
ПНД	WC 4%	1,41
ПНД	WC 5%	1,61
ПНД	WO_3 1%	1.02

ПНД	WO ₃ 2%	1,08
ПНД	WO ₃ 3%	1,14
ПНД	WO ₃ 4%	1,21
ПНД	WO ₃ 5%	1,27
ПНД	ТТК 1%	1,05
ПНД	ТТК 2%	1,15
ПНД	ТТК 3%	1,24
ПНД	ТТК 4%	1,34
ПНД	ТТК 5%	1,43

Ниже представлены результаты проведенных экспериментов для модифицированного полиэтилена низкого давления с различным содержанием нанопорошком WC (табл. 2), WO₃ (табл. 3), ТТК (табл. 4).

Таблица 2. Вторичный ПЭТ низкого давления (НД), с различным содержанием нанопорошка WC

Длина процесса истирания, м	Суммарная потеря массы образцов, мг	Потеря объёма на 1 м. дистанции истирания мм ³ /м.	Процент добавления нанопорошка
50	74	1,557	0
50	89	1,616	1
50	91	1,452	2
50	93	1,366	3
50	97	1,380	4
50	104	1,293	5

Таблица 3. Вторичный ПЭТ низкого давления (НД), с различным содержанием нанопорошка WO₃

Длина процесса истирания, м	Суммарная потеря массы образцов, мг	Потеря объёма на 1 м. дистанции истирания мм ³ /м.	Процент добавления нанопорошка
50	79	1,558	1
50	85	1,576	2
50	86	1,504	3
50	90	1,491	4
50	89	1,399	5

Таблица 4. Вторичный ПЭТ низкого давления (НД), с различным содержанием нанопорошка ТТК

Длина процесса истирания, м	Суммарная потеря массы образцов, мг	Потеря объёма на 1 м. дистанции истирания мм ³ /м.	Процент добавления нанопорошка
50	84	1,606	1
50	82	1,432	2
50	93	1,501	3
50	91	1,336	4
50	95	1,325	5

На рисунке 1, 2, 3 представлены изменения характеристики абразивной стойкости в сравнении с показателями стандартного материала ПЭТ НД.

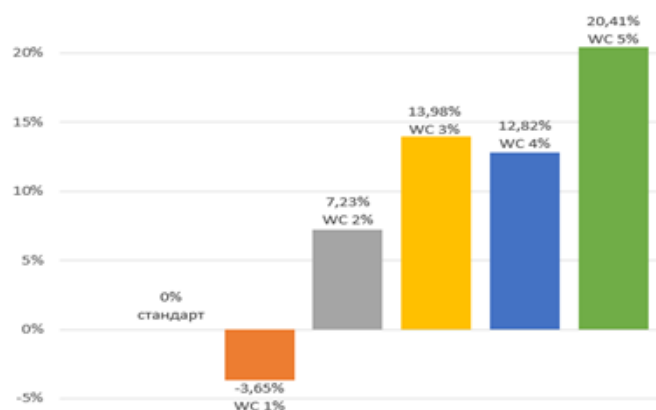


Рисунок 1. Изменение значений износоустойчивости образцов ПЭТ НД, при добавлении нанопорошка карбида титана, %

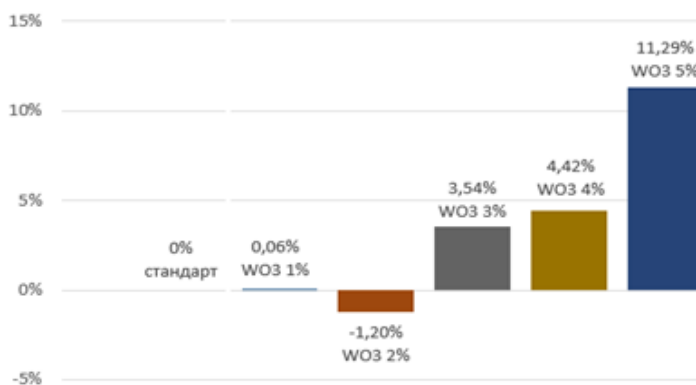


Рисунок 2. Изменение значений износоустойчивости образцов ПЭТ НД, при добавлении нанопорошка оксида вольфрама (VI), %

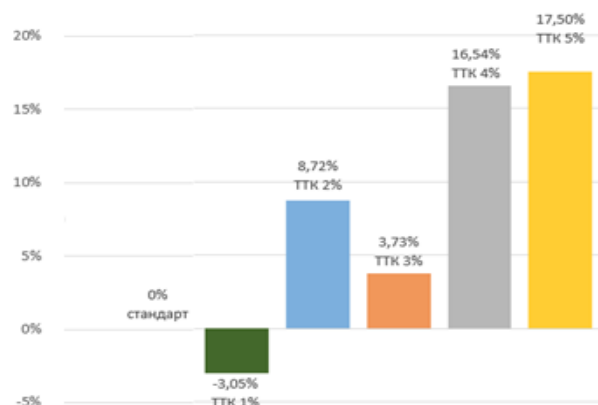


Рисунок 3. Изменение значений износостойкости образцов ПЭТ НД, при добавлении нанопорошка ТТК, %

В результате проведенных экспериментов, можно говорить о положительном влиянии нанопорошка на уменьшение показателей абразивного износа. Наилучший результат можно наблюдать при добавлении нанопорошка карбида вольфрама в количестве 3–5% к массе основы, абразивный износ снижается на 13–20 %. Модификация полиэтилена 3–5% нанопорошком ТТК снижает износ до 17,5%. При введении наночастиц оксида вольфрама (VI) 5% в состав полиэтилена снижает абразивный износ до 11%.

Список литературы

1. Паничкин, Т. А. Перспективы использования вольфрам-содержащих соединений для модификации вторичного ПЭТ / Т. А. Паничкин, С. М. Братан, Н. В. Собиров // СНК-2024 : материалы LXXIV международной студенческой научной конференции Московского Политеха, Москва, 01–26 апреля 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2024. – С. 272-277. – EDN ENGWFU.
2. Пачоли Консалтинг: Рынок полиэтилена. URL: <https://www.pacioliconsult.ru/press-senter/analitica/Рынок%20полиэтилена.pdf>
3. Саввинова, М. Е. Выбор перспективных наполнителей для полиэтиленов ПЭ80Б и ПЭ2НТ11 / М. Е. Саввинова, Е. С. Петухова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1(24). – С. 38. – EDN PYZMYT.
4. Баулин, А. А. Повышение стойкости к растрескиванию композиции полиэтилена низкого давления / А. А. Баулин, А. В. Каландин, Н. А. Кудрявцева // Пластические массы. – 2015. – № 9-10. – С. 21-25. – EDN WKBESJ.
5. Повышение стойкости к растрескиванию полиэтилена высокого давления, модифицированного ультрадисперсными порошками / М. А. Ильин, В. И. Верещагин, Д. В. Тихонов, О. Б. Назаренко // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 1. – С. 99-101. – EDN HZNIIN.
6. Модификация структуры и физико-механических свойств конструкционных полиэтиленов неорганическими добавками / З. А. Коротаева, Г. Е. Селютин, Б. П. Толочко [и

др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2022. – Т. 30, № 2. – С. 158-166. – DOI 10.15372/KhUR2022369. – EDN VNLYZH.

7. Гордиенко, В. П. Влияние УФ-облучения на износостойкость полиэтилена, содержащего дисульфид молибдена различной степени дисперсности / В. П. Гордиенко, В. Г. Сальников // Пластические массы. – 2011. – № 12. – С. 48-50. – EDN OYBNJD.

8. Модифицирование полимеров нанодисперсными керамическими частицами / В. А. Полубояров, З. А. Коротаева, И. А. Паули [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22, № 4. – С. 401-407. – EDN SNNCKD.

9. Гордиенко, В. П. Исследование износостойкости линейного полиэтилена, содержащего дисульфид молибдена различной степени дисперсности / В. П. Гордиенко, В. Г. Сальников // Пластические массы. – 2010. – № 11. – С. 45-48. – EDN TJZCDV.

10. Чанг Ли. Влияние наночастиц на трибологические свойства поли (эфиримидных) композитов, армированных коротким углеродным волокном. [Текст]/ Чжан З., Чжан Х., Фридрих К // Журнал прикладной науки о полимерах, - 2005 - том 108, стр. 1675-1679.

11. ГОСТ 11012 – 2017. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ : Межгосударственный стандарт : дата введения 2018-07-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и стандартизации. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 6 с.

12. Kuznetsov A.V. annotation of a new low-threshold potential-dependent calcium channel of trichoplax adhaerens (phylum placozoa) / Kuznetsov A.V., Kartashov L.E. Biophysics. 2024. Т. 69. № 1. С. 25-42.

13. Kuznetsov A.V. Аннотация нового низкопорогового потенциал-зависимого кальциевого канала трихоплакса trichoplax adhaerens (тип placozoa) / Кузнецов А.В., Карташов Л.Е. Биофизика. 2024. Т. 69. № 1. С. 32-52.

УДК 621.7

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Э.С. Гордеева¹,
В.Б. Богуцкий²**

^{1,2}*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация*

АННОТАЦИЯ

В статье выполнен анализ технологических процессов производства зубчатых колес из порошковых материалов для привода электроинструментов производимых на АО «Завод «ФИОЛЕНТ». Рассмотрены процессы подготовки металлического порошка, прессования заготовок, а также процессы последующей механической - термической обработки полученных деталей. На основе выполненного анализа выявлены основные факторы, влияющие на физико-механические свойства готовых деталей электроинструмента.

Ключевые слова: порошковая металлургия, металлические порошки, прессование и спекание, термическая обработка.

EVALUATION OF THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING BLANKS FROM POWDER MATERIALS FOR SMALL-MODULE GEARS

*E.S. Gordeeva¹,
V.B. Bogutsky²*

^{1,2}, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

In article analyzes the technological processes of the production of gears from powder materials for driving electric tools produced at JSC «FIOLENT». The processes of preparation of metal powder, pressing of billets, as well as the processes of subsequent mechanical - heat treatment of the obtained parts are considered. On the basis of the analysis performed, the main factors affecting the physico-mechanical properties of the finished parts of the power tool were identified.

Keywords: powder metallurgy, metal powders, pressing and sintering, heat treatment.

Введение. Номенклатура деталей, полученная способом порошковой металлургии, имеет широкое применение в машиностроении, автомобилестроении, энергетике, при производстве средств связи, в авиакосмической промышленности и др. К ним относятся детали типа втулок, зубчатых колес, рычагов, кулачков, поршня и ряд других деталей. Связанно это с тем, что изготовление деталей методом порошковой металлургии является одним из перспективных направлений металлообработки и обеспечивает ряд преимуществ, таких как: высокий коэффициент использования материала (до 0,9...0,95), высокая технологичность, высокая производительность, низкая трудоёмкость, возможность получения точных размеров – 7...8 квалитетов без дополнительной механической обработки, широкий диапазон свойств и возможность получения уникальных свойств изделия [1-4 и др.]. Следует отметить, что в конструкциях современного электроинструмента, детали, полученные методом порошковой металлургии составляют 55...70%.

Основная часть. Металлические порошки – основа порошковой металлургии, технология которой начинается с их получения. Метод производства и природа соответствующего металла, сплава или металлоподобного соединения определяют химические (содержание основного металла, примесей и загрязнений, пирофорность и токсичность), физические (форма, размер, удельная поверхность, истинная плотность и микротвердость частиц) и технологические (насыпная плотность, текучесть, уплотняемость, прессуемость и формуемость порошка) свойства получаемого металлического порошка. Основными методами получения порошков являются: получение порошков путем измельчения твердых материалов в мельницах разных типов (шаровая вращающиеся, вибрационная и планетарная центробежная), получение порошков железа и меди восстановлением их оксидов водородом и твердым углеродом в трубчатых и камерных печах [4-7].

Цель статьи – выполнить анализ технологических процессов производства зубчатых колес из порошковых материалов, эксплуатируемых в приводах электроинструментов производства АО «Завод «ФИОЛЕНТ» и определить технологические операции, на которых наиболее вероятно возникновение брака.

Объектом исследований являются зубчатые колеса механических передач электроинструментов, производимых на предприятии АО «Завод «ФИОЛЕНТ» (см. рисунки 1,2) из порошка Distaloy AB+Graphite UF4 + Kerolub P11. Химический состав представлен в таблице 1[8].



Рисунок 1. Заготовки зубчатых колес, производимые методом порошковой металлургии на АО «Завод «Фиолент».

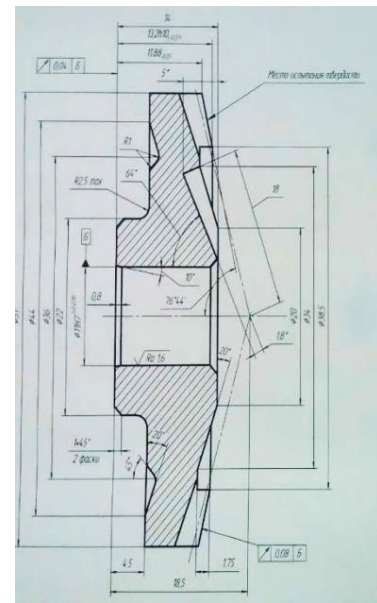


Рисунок 2. Чертеж колеса зубчатого ИДФР.722333.001

Таблица 1. Химический состав порошка Distaloy AB.

Материал	Содержание (%)
C	0,8
O	0,1
Cu	1,5
Ni	1,75
Mo	0,5

На первом этапе производства деталей, порошок проходит тщательную проверку. Каждая вновь поступающая в производство партия железных порошков должна подвергаться контролю содержания кислорода, углерода, насыпной плотности и гранулометрического состава, а также дату изготовления порошка [7, 9-11].

При сроке хранения порошка более двух месяцев с момента вскрытия герметичной упаковки перед использованием сырья выполняется операция по подготовки: перемешивание в смесителях небольшой порции порошка (до 20 кг) в течении 120 ± 15 мин (на предприятии применяется смеситель конусный модели СК, см. рисунок 3) [12].

По окончании операции проверяется внешний вид порошка: порошок должен быть однородным. Не допускаются посторонние включения, комочки, видимые невооружённым глазом. Эта операция одна из значимых, т. к. качество сырья и готовой детали непосредственно взаимосвязаны и некачественное выполнение операции приводит к частичному или полному браку деталей.

На следующей операции с использованием прессы мод. РУЕ-160 (см. рисунок 4) производится формовка заготовок. Порошок засыпают в полость прессформы, выравнивая с верхней частью матрицы, устанавливают верхний пуансон и прессуют в течении 2...5 секунд с

рабочим давлением $9,5 \pm 0,5$ МПа. Согласно [5, 7, 9 и др.] и опыту производства заготовок из порошковых материалов на АО «Завод «ФИОЛЕНТ», недостаточное или избыточное давление негативно сказывается на структуре заготовки.



Рисунок 3. Смеситель конусный мод. СК.



Рисунок 4. Пресс мод. РУЕ-160.

После извлечения заготовки толкателем производится контроль основных размеров (микрометр МК 25-1) и контроль внешнего вида. Согласно [10] на формованных заготовках не допускаются трещины, расслоения, забоины, инородные включения. На зубчатом венце не допускаются сколы и выкрашивания. На кромках заготовок допускаются сколы и выкрашивания шириной не более 0,3 мм и не более 2х на поверхность. Объем контроля – 100% партии. Следует отметить, что на данной операции контролируются только размеры и внешний вид, а качеству полученной структуры материала не уделяется должного внимания.

Сформованные заготовки партиями (см. рисунок 5) загружаются в вакуумную печь (см. рисунок 6) и спекаются.

Операция спекания выполняется в несколько этапов:

- этап I – ступенчатый нагрев в постоянном вакууме $P_v \geq 1,33$ Па, по программе до температуры $T = 1130 \pm 20^\circ\text{C}$, выдержка в течении 3...5 часов;
- этап II – охлаждение печи с заготовками до $T = 480 \pm 20^\circ\text{C}$ и выдержка при этой температуре в течении 40 мин;
- этап III – разогрев печи до температуры $T = 780 \pm 20^\circ\text{C}$ и выдержка при этой температуре в течении 30 мин;
- этап IV – охлаждение печи с заготовками до $T = 600 \pm 20^\circ\text{C}$ и выдержкой 40 мин.

По окончании времени выдержки подогрев печи отключается и при $T = 50 \pm 20^\circ\text{C}$ отключается вакуумный насос.

Температура спекания и время выдержки каждой партии заготовок фиксируется в рабочем журнале спекальщика и уточняется по результатам измерения размеров заготовок предыдущего спекания. Если после спекания заготовок их размеры получились на нижнем пределе, то температуру спекания необходимо снизить на 10°C , если размеры на верхнем пределе – увеличить температуру на 10° [13...16].

После извлечения заготовок из печи их остывания до $T \approx 20^\circ\text{C}$ выполняется контроль основных размеров согласно карте эскизов. При несоответствии размеров заготовки направляются на повторное спекание, режимы которого уточняются технологом по результатам измерения заготовок и анализа правильности выполнения временного и температурного графика операции спекания.



Рисунок 5. Загружаемая партия заготовок.



Рисунок 6. Вакуумная печь СЭВ

В случаях некачественного выполнения работы после термической операции испытания по твердости показывают, что заготовка имеет на различных поверхностях и их участках различные значения твердости, которые колеблются в заданном пределе, или превышают максимальное значение по твердости на 30%.

Детали, которые имеют различные значения твердости находящиеся в допустимом диапазоне подвергаются термической обработке: нагреву до $T=880\ldots900^{\circ}\text{C}$ в защитной атмосфере (пропан-бутан 35%), с временем выдержки 40 мин., охлаждением в масле и отпуску при $T=200^{\circ}\text{C}$, в течении 2-х часов с охлаждением на воздухе.

Пройдя еще через ряд операций, таких как токарная, калибровочная, контрольная, заготовка попадает на операцию – «обкатка». Заготовка обкатывается в зацеплении с шестерней, в течении 40 с, под определенным давлением в присутствии смазки. Обкатка обеспечивает гладкую блестящую поверхность зубьев, но точность профиля и шага колеса при этом не улучшается.

Выводы. Анализ технологии производства зубчатых колес из порошковых материалов для привода электроинструментов производимых на АО «Завод «ФИОЛЕНТ» показывает, что ее использование обеспечивает выполнение требований к внешнему виду детали, однако эксплуатационно-технические требования к ней могут гарантироваться только при обязательном выполнении операции предварительной подготовки порошка, «жестком» контроле температурных и временных режимах на операции спекания со стороны технолога и достаточно высокой квалификации спекальщика.

Список литературы

1. Современные технологии, обеспечивающие конкурентные преимущества электроинструмента. [Электронный ресурс] URL: <http://www.phiolent.com/about/production>. – Дата обращения 18.01.19.
2. Производство материалов методом порошковой металлургии [Электронный ресурс] URL: <http://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/poroshkovaya-metallurgiya> – Дата обращения 20.01.19.

3. Panda A., Dobránsky J., Jančík M., Pandová I., Kačalová M. Advantages and effectiveness of the powder metallurgy in manufacturing technologies // METALURGIJA, №57, 2018. – PP. 353-356.
4. Tadayuki Tsutsui. Recent Technology of Powder Metallurgy and Applications. Hitachi Chemical Technical Report No.54. 2018. – PP. 12-20.
5. Powder Metallurgy. Edited by Katsuyoshi Kondoh. Publ.InTech Janeza Trdine, Croatia, 2012. – 132p.
6. Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Порошковые материалы. – СПб.: ВШТЭ СПб ГУПТД, 2017. – 74 с.
7. Kuznetsov A.V. ANNOTATION OF A NEW LOW-THRESHOLD POTENTIAL-DEPENDENT CALCIUM CHANNEL OF TRICHOPLAX ADHAERENS (PHYLUM PLACOZOA) / Kuznetsov A.V., Kartashov L.E. Biophysics. 2024. Т. 69. № 1. С. 25-42.
8. Kuznetsov A.V. АННОТАЦИЯ НОВОГО НИЗКОПОРОГОВОГО ПОТЕНЦИАЛ-ЗАВИСИМОГО КАЛЬЦИЕВОГО КАНАЛА ТРИХОПЛАКСА TRICHOPLAX ADHAERENS (ТИП PLACOZOA) / Кузнецов А.В., Карташов Л.Е. Биофизика. 2024. Т. 69. № 1. С. 32-52.
9. S. Glodež et al.. Determination of service life of sintered Powder metallurgy gears in regard to tooth bending fatigue//Croat. j. for. eng. №39, 2018. – PP.129-137.
10. РД 5Р.9921-91. Детали спеченные из порошков на основе железа и меди. Типовые технологические процессы. – М.: 1991. – 167 с.
11. Богущкий В.Б., Мхитарян С.М. Формирование поверхностного слоя при абразивной обработке деталей из спеченных порошковых материалов. Ростовский научный журнал. 2019. № 3. С. 312-320.
12. Никифорова Э.М., Кравцова Е.Д. Проектирование и оборудование цехов по производству порошковых и композиционных материалов. Версия1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций.– Электрон. дан. (12Мб).– Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
13. ГОСТ 9849-86. Порошок железный. Технические условия.– М.: Стандартиформ, 2011. – 10 с.
14. ASM Metals HandBook: Vol. 4: Heat Treating (Asm Handbook). – Publ: ASM International, 1991. – 2173 p.
15. Senthilkumar T., Tajudeen K.Ajiboye. Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 11(02), 2012. DOI: 10.4236/jmmce. 2012.112011.
16. Богущкий В.Б., Иваничев С.С. Металлургическая наследственность и её влияние на качество. В сб.: наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения. сборник статей VIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч.. 2018. С. 98-100.

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 641.56

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДЕСЕРТА «ЧИЗКЕЙК КРЫМСКАЯ СКАЗКА»

О. В. Нестеренко¹

¹*Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация*

АННОТАЦИЯ

Проблема функционального питания является важной. Недостаточное потребление биологически активных веществ ведет к ухудшению здоровья, снижению защитных сил организма. Нами разработана технология чизкейка «Крымская сказка». Полученный десерт привлекает внимание своим необычным вкусовым сочетанием и является дополнительным источником биологически активных веществ. В статье представлена рецептура и технология приготовления десерта, приведена энергетическая и биологическая ценность. Данный десерт будет предложен предприятиям общественного питания г. Севастополя для расширения ассортимента десертов функционального назначения.

Ключевые слова: десерт, чизкейк, шпинат, черная смородина, груша, айва, витамины, минеральные элементы, энергетическая ценность, биологическая ценность, функциональный, технология.

DESIGNING A FUNCTIONAL DESSERT "CRIMEAN FAIRY TALE CHEESECAKE"

O. V. Nesterenko¹

¹*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

ABSTRACT

The problem of functional nutrition is important. Insufficient intake of biologically active substances leads to deterioration of health and a decrease in the body's defenses. We have developed the Crimean Fairy Tale cheesecake technology. The resulting dessert attracts attention with its unusual flavor combination and is an additional source of biologically active substances. The article presents the recipe and technology of dessert preparation, energy and biological value. This dessert will be offered to catering establishments in Sevastopol to expand the range of desserts for functional purposes.

Keywords: dessert, cheesecake, spinach, black currant, pear, quince, vitamins, mineral elements, energy value, biological value, functional, technology.

Введение. На сегодняшний день разработка продукции функционального назначения остается актуальной.

Функциональный пищевой продукт - это пищевой продукт, предназначенный для

систематического употребления в составе пищевых рационов всеми возрастными группами здорового населения, снижающий риск развития заболеваний, связанных с питанием, сохраняющий и улучшающий здоровье за счет наличия в его составе физиологически функциональных пищевых ингредиентов [1].

К функциональным пищевым ингредиентам относят физиологически активные, ценные и безопасные для здоровья ингредиенты с известными физико-химическими характеристиками, для которых выявлены и научно обоснованы полезные для сохранения и улучшения здоровья свойства, установлена суточная физиологическая потребность: растворимые и нерастворимые пищевые волокна (пектины и др.), витамины (витамин Е, токотриснолы, фолиевая кислота и др.), минеральные вещества (кальций, магний, железо, селен и др.), жиры и вещества, сопутствующие жирам (полиненасыщенные жирные кислоты, растительные стеролы, конъюгированные изомеры линолевой кислоты. структурированные липиды, сфинголипиды и др.). полисахариды, вторичные растительные соединения (флавоноиды/полифенолы, каротиноиды, ликопин и др). пробиотики, пребиотики и синбиотики».

Функциональным считается продукт, если он удовлетворяет в функциональном ингредиенте не менее 15% от суточной физиологической потребности [1].

Основная часть. На кафедре «Пищевые технологии и оборудование» разработана технология приготовления функционального десерта «Чизкейк Крымская сказка».

Десерт на финиковой основе с добавлением функциональных растительных ингредиентов: шпината, ягод чёрной смородины, груши, айвы.

Основа десерта творог. Творог относится к особо ценному сырью, так как в его химический состав входит полноценный белок.

Шпинат богат витаминами: А, С, К. Он в достаточном количестве содержит железо, калий, магний, йод. Полезные свойства шпината представлены тем, что его используют при авитаминозе, сахарном диабете, остеопарозе.

Ягоды черной смородины содержат витамины: Е, Р, К, А, В4. Витамин С находится в большом количестве. Ягоды богаты железом, магнием, фосфором, селеном, калием и кальцием. В ее состав входят: пектин, органические кислоты, каротиноиды, сахара, фенолы, антоцианы. Если регулярно употреблять ягоды черной смородины нормализуется работа сердца и нервной системы, улучшается память и умственные способности. Пектин связывает и выводит из организма токсины и ионы тяжелых металлов, поэтому смородина полезна при отравлениях и интоксикациях.

В плодах груш содержатся практически все полезные вещества: витамины - А, С, Е, Н, К, РР, группы В; макроэлементы (кальций, магний, натрий, калий, фосфор, хлор, сера), микроэлементы (железо, цинк, йод), органические кислоты, эфирные масла, флавоноиды, фитонциды и другие биологически активные вещества. Органические кислоты, находящиеся в плодах груш, улучшают пищеварение, обмен веществ, стимулируют деятельность почек и печени. Эфирные масла повышают защитные силы организма, оказывают противовоспалительное действие.

Айва богата витаминами и минералами: витамином С, витаминами группы В, железом, магнием, медью, калием. Витамин С - способствует уменьшению риска сердечных болезней. Обладает антисептическим, мочегонным, вяжущим, аналептическим свойствами. Весьма эффективна при печеночной недостаточности, туберкулезе, дизентерии.

Плоды фиников содержат: медь, железо, магний, калий, кальций; витамины: С, группы В, К, Н, Е, РР, в составе присутствуют Омега-3 жирные кислоты. Употребление плодов оказывает благоприятное воздействие на сердце, печень, почки, способствует развитию в кишечнике полезных бактерий, поддерживает кислотный баланс организма, усиливает способность организма противостоять различным инфекциям, в том числе вирусным. Финики

полезны также при анемии и гипертонии, для мозговой деятельности.

Прежде чем приступить к разработке десерта был изучен ассортимент десертов, представленный в предприятиях индустрии питания г. Севастополя.

Преимущества нашего десерта в том, что: натуральные ингредиенты; с минимальным содержанием жиров; одновременно используется овощная зелень, ягоды и плоды; финиковая основа; без выпечки; свежий и яркий вкус; повышенная биологическая ценность.

Также проведено анкетирование потенциальных потребителей. В опросе участвовало 100 респондентов.

В результате обработки анкет получено:

- на вопрос «Хотели бы, вы, попробовать наш чизкейк?» - 73% респондентов ответили положительно, 27% - ответили отрицательно;
- на вопрос «Считаете ли, вы, ингредиенты нашего чизкейка функциональными?» - 38 % потенциальных потребителей ответили «да», 14% - «нет», 48% - затрудняются ответить.
- на вопрос «Считаете ли, вы, наш десерт полезным?» - 54% респондентов ответили «да», 9% - «нет», 37% - затрудняются ответить.

Таким образом, большую часть респондентов заинтересовал вкус и состав изделия. Однако, 48% опрошенных не знают, что такое функциональные ингредиенты.

Разработка рецептуры происходила в несколько этапов, что отражено в актах проработки. Представленная рецептура более гармонична по вкусу ингредиентов.

Рецептура десерта «Чизкейк Крымская сказка» представлена в таблице 1.

Таблица 1. Рецепт десерта на одну порцию «Чизкейк Крымская сказка»

Наименование сырья и полуфабрикатов	Расход сырья и продуктов на 1 порцию, г	
	БРУТТО	НЕТТО
Основа		
Финики	8,3	7
Грецкий орех	11,1	5
Овсяная мука	4	4
Творожная масса		
Желатин	3	3
Вода холодная кипяченая	15	15
Творог 9%	30	30
Сахарная пудра	5	5
Сливки 30% жирности	7	7
Шпинат	9,5	7
Ванильный сахар	1	1
Черная смородина (ягоды)	10,2	10
Фруктовое желе		
Айва	8	7
Груша	12,3	11

Желатин	2	2
Вода холодная кипяченая	6	6
Выход	-	120

Выход готового изделия - 1200 г.

Технология приготовления десерта:

Приготовление основы. У фиников вынуть косточки. В блендере объединить финики, грецкий орех и овсяную муку, перемолоть. Распределить основу на дно формы. Выпекать в разогретом духовом шкафу до 180 °С 5-7 минут.

Приготовление творожной массы. Творог взбить блендером, добавить сливки, сахарную пудру, ванильный сахар и все еще раз хорошо взбить блендером до однородной массы.

Шпинат перебрать, удалить увядшие, испорченные и грубые листья, отрезать корешки. Промыть несколько раз в большом количестве проточной воды. Просушить, измельчить блендером, добавить в творожную массу, все хорошо перемешать, добавить ягоды смородины и перемешать.

Желатин залить холодной кипячёной водой и оставить для набухания. Набухший желатин поставить на водяную баню для полного растворения влить в творожную массу и перемешать.

Выложить на основу творожную массу, поставить в холодильник до застывания.

Приготовление плодового желе. Желатин залить холодной кипяченой водой и оставить для набухания. Набухший желатин поставить на водяную баню для полного растворения.

Айву помыть, удалить сердцевину с семенами, нарезать на половинки. Наполнить кастрюлю водой, довести воду до кипения, затем выложить половинки айвы и убавить огонь. Закрыть крышкой и готовить 15 минут. Вынуть остудить.

Грушу помыть, удалить сердцевину с семенами. Отварную айву и грушу нарезать слайсами 2-3 мм толщиной, выложить на застывший чизкейк спиралью, чередуя плоды, залить желатином и поставить в холодильник до застывания.

Ниже приведены органолептические показатели качества готового изделия:

Внешний вид – поверхность без трещин и разрывов, желе прозрачное, не мутное. На разрезе с включениями шпината, ягодами черной смородины.

Цвет - свойственный внесенным ингредиентам.

Консистенция - плотная, основа рассыпчатая.

Вкус и запах - свойственный внесенным ингредиентам, без посторонних привкусов и запахов.

Рассчитана энергетическая и биологическая ценность изделия. Рассмотрено на сколько процентов порция десерта сможет удовлетворять суточную физиологическую потребность в белках, жирах, углеводах, пищевых волокнах, витаминах и минеральных элементах. Руководствовались методическими рекомендациями «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» [2].

Пищевая и энергетическая ценность десерта рассчитана на одну порцию, использовали данные справочных таблиц «Химический состав пищевых продуктов» [3]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Энергетическая ценность десерта «Чизкейк Крымская сказка» (выход 120 г)

Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Калорийность, ккал
11,8	8,2	17,7	191,8

Получено, что при употреблении порции изделия массой 120 г суточная физиологическая потребность будет удовлетворена:

- в белках: для женщин от 13,1% до 19,6%, для мужчин – от 10,3% до 15,7%;
- в жирах: для женщин от 8,2% до 14,4%, для мужчин – от 6,5% до 11,3%;
- в углеводах: для женщин от 4,1% до 7,4%, для мужчин – от 3,2% до 5,9%.

В пищевых волокнах – от 8,4% до 10,5%.

Биологическая ценность десерта рассчитана на одну порцию, использовали данные справочных таблиц «Химический состав пищевых продуктов» [4], а также показано, на сколько процентов будет удовлетворена физиологическая суточная потребность рассматриваемых нутриентов. Результаты представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Содержание минеральных элементов в десерте «Чизкейк Крымская сказка» и удовлетворение физиологической суточной потребности (выход 120 г)

Наименование минерального элемента								
Na, мг	K, мг	Ca, мг	Mg, мг	Fe, мг	P, мг	Se, мкг	I, мкг	Zn, мг
25,97	218,69	116,47	37,81	2,01	132,18	9,67	4,93	0,33
Удовлетворение физиологической суточной потребности, %								
2	6,2	11,6	9	20,1* 11,2**	18,9	13,8* 17,6**	3,3	2,8

*- мужчина

** - женщина

Таблица 4. Содержание витаминов в десерте «Чизкейк Крымская сказка» и удовлетворение физиологической суточной потребности (выход 120 г)

Наименование витамина								
A, мкг	D, мкг	E, мг	K, мкг	C, мг	B ₁ , мг	B ₂ , мг	B ₆ , мг	PP, мг
101,9	0,03	0,6	34,2	26,0	0,1	0,5	0,1	3,6
Удовлетворение физиологической суточной потребности, %								
11,3* 12,7**	0,2	4	28,5	26,0	6,7	27,8	5,0	18,0

*- мужчина

** - женщина

Выводы. Таким образом, разработанный десерт является функциональным, так как порция изделия больше чем на 15% удовлетворяет суточную потребность в минеральных элементах: Fe (для мужчин), P, Se (для женщин), витаминах: K, C, B₂, PP.

Получено, десерт является дополнительным источником биологически активных веществ. Такой десерт можно порекомендовать для повышения иммунитета, профилактики остеопороза, нормального метаболизма, поддержания функций центральной нервной системы.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52349-2005 Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определения - Введен впервые. - Москва: Стандартинформ, 2006. - 17 с.
2. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: Методические рекомендации. - М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека,

2021. - 72 с.

3. Химический состав российских пищевых продуктов : Справочник / Под ред. член-корр. МАИ, проф. И. М. Скурихина и академика РАМН, проф. В. А. Тутельяна. - М.: ДеЛи принт, 2002. - 236 с.

4. Химический состав пищевых продуктов : Справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, микро- и макроэлементов, органических кислот и углеводов. Кн. II: / Под ред. И. М. Скурихина и М. Н. Волгарева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1987. - 360 с.

