

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

ISSN:2618-8201

№1 (33)
2024

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

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

«Севастопольский государственный университет»

№ 1(33)

2024

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2024

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

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2024 г. №1 (33)

*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: 20.12.2024 г.

Тираж: 25 экз.

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

Братан С.М., Часовитина А.С. Формирование векторов входных и выходных переменных процесса внутреннего шлифования при обработке заготовок из титана и титановых сплавов.....	4
Харченко А.О., Сидоров Д.Е., Лазуткин В.О. Совершенствование способов изготовления рабочей части пластически деформирующих метчиков.....	8
Левченко Е.А., Новиков Л.Л. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей при виброабразивной обработке с применением ультразвука.....	14
Ваниев Э.Р., Абдуразаков Л.Т., Кавляметов Р.К. Повышение теплоотвода из зоны резания при точении на основе применения инструмента с внутренним воздушным охлаждением.....	21
Буданов А.А., Карлов А.Г. Оптимизация движения инструмента автоматизированного комплекса лазерной резки металлических труб.....	33

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Паничкин Т.А., Сабиров Н.В., Шагова Ю.О. Перспективы использования наночастиц карбида вольфрама для модификации вторичного ПЭТ высокого давления.....	41
--	----

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Чуб О.П., Еременко Д.О. Разработка печенья овсяного функционального назначения....	46
---	----

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.7

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРОВ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С.М. Братан¹,
А.С. Часовитина¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Российская Федерация.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен процесс декомпозиции операции внутреннего шлифования. Для описания поведения каждой полученной подсистемы с учетом прямых и обратных связей были получены функции переходов и выходов. Для выделенные подсистемы (*И* – «инструмент», *ОС* – «окружающая среда», *З* – «заготовка»; *ЗК* – «зона контакта»; *ТС* – «технологическая система») были определены свойства, параметры состояния и векторы входных и выходных переменных, получены векторы параметров состояний.

Ключевые слова: декомпозиция, параметры состояния, шлифование.

FORMATION OF VECTORS OF INPUT AND OUTPUT VARIABLES OF THE INTERNAL GRINDING PROCESS DURING THE PROCESSING OF BLANKS MADE OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS

S.M. Bratan¹,
A.S. Chasovitina¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

ABSTRACT

The process of decomposition of the internal grinding operation is considered. To describe the behavior of each obtained subsystem, taking into account forward and backward connections, the functions of transitions and outputs were obtained. For the selected subsystems ("tool", "environment", "workpiece"; "contact zone"; "technological system"), properties, state parameters and vectors of input and output variables were determined, vectors of state parameters were obtained.

Keywords: decomposition, condition parameters, grinding.

Введение. На сегодняшний день в условиях растущего предложения от различных производителей одной из приоритетных задач предприятия является разработка технологических процессов, удовлетворяющих ряд запросов потребителей. В связи с этим перед предприятиями стоит задача повышения производительности процесса изготовления изделий с заданными параметрами точности обработки и качества поверхности. Такая задача особенно актуальна для обработки точных отверстий.

Обработка точных отверстий может быть осуществлена различными способами – ультразвуковой обработкой, лазерной, высокоскоростным фрезерованием или абразивно-

алмазной обработкой. В абразивно-алмазной обработке широко используется внутреннее шлифование благодаря своей высокой производительности и точности обрабатываемой поверхности. При этом возможно получение 7-6 квалитета точности при чистовом и 6-5 квалитета – при тонком шлифовании [1].

С целью установления взаимосвязей режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при внутреннем шлифовании, был использован системный анализ, являющийся одним из наиболее прогрессивных направлений системного подхода [2].

Основная часть. На основе системного подхода рассмотрена структура операции, сформулированы основные положения и принципы анализа процесса внутреннего шлифования. По функциональным признакам анализируемая операция была разделена на подсистемы: «Инструмент» (И), «Заготовка» (З), «Технологическая система» (ТС) и особую подсистему- «Зона контакта» (ЗК). Каждая из подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, вектор возмущающих воздействий. [3]

Для формирования векторов входных и выходных переменных процесса рассмотрим операцию внутреннего шлифования как динамическую систему.

Для описания поведения каждой подсистемы с учетом прямых и обратных связей были получены функции переходов и выходов. Выделенные подсистемы (*И* – «инструмент», *ОС* – «окружающая среда», *З* – «заготовка»; *ЗК* – «зона контакта»; *ТС* – «технологическая система») обладает определенными свойствами, параметрами состояния и векторами входных и выходным переменных, тем самым представляет из себя «набор» параметров состояний.

Рассмотрим формирование описанных векторов для подсистемы «зона контакта» $Z_{ЗК}$: вектор начальных входных переменных – $X_{ЗК}^{НП}$; вектора входных переменных поступающих из других подсистем – $Y_3^{ЗК}, Y_{ТС}^{ЗК}, Y_I^{ЗК}, Y_{ОС}^{ЗК}$; вектор выходных переменных – $Y_{ЗК}$. Соответственно, исходное состояние системы $\Phi_{ЗК}$ будет описано зависимостью:

$$Z_{ЗК} = \Phi_{ЗК}(X_{ЗК}^{НП}, Y_I^{ЗК}, Y_{ТС}^{ЗК}, Y_3^{ЗК}, Y_{ОС}^{ЗК}, \tau).$$

В момент времени τ выходные переменные подсистемы будут описаны зависимостью:

$$Y_{ЗК} = F_{ЗК}(Z_{ЗК}, X_{ЗК}^*, \tau),$$

где $X_{ЗК}^*$ – вектор входных переменных, оказывающий непосредственное влияние на выходные параметры.

Аналогичным образом были получены зависимости, описывающие состояние технологической системы. Взаимодействие всех подсистем может быть представлено в виде системы (1).

$$\left. \begin{aligned} Z_I &= \Phi_I(X_I^{НП}, Y_{ТС}^I, Y_{ЗК}^I, Y_{ОС}^I, \tau); \\ Z_{ЗК} &= \Phi_{ЗК}(X_{ЗК}^{НП}, Y_I^{ЗК}, Y_{ТС}^{ЗК}, Y_3^{ЗК}, Y_{ОС}^{ЗК}, \tau); \\ Z_{ТС} &= \Phi_{ТС}(X_{ТС}^{НП}, Y_I^{ТС}, Y_{ОС}^{ТС}, Y_3^{ТС}, Y_{ЗК}^{ТС}, \tau); \\ Z_3 &= \Phi_3(X_3^{НП}, Y_{ТС}^3, Y_{ЗК}^3, Y_{ОС}^3, Y_I^3, \tau); \\ Z_{ОС} &= \Phi_{ОС}(X_{ОС}^{НП}, Y_{ТС}^{ОС}, Y_3^{ОС}, Y_I^{ОС}, Y_{ЗК}^{ОС}, \tau) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Y_I &= F_I(Z_I, X_I^*, \tau) \\ Y_{ЗК} &= F_{ЗК}(Z_{ЗК}, X_{ЗК}^*, \tau) \\ Y_{ТС} &= F_{ТС}(Z_{ТС}, X_{ТС}^*, \tau) \\ Y_3 &= F_3(Z_3, X_3^*, \tau) \\ Y_{ОС} &= F_{ОС}(Z_{ОС}, X_{ОС}^*, \tau) \end{aligned} \quad (1)$$

Стоит отметить, что и значения параметров в предыдущий момент времени $\tau - \Delta\tau$, также влияют на ее текущее состояние подсистемы:

$$Z(\tau) = \Phi[Z(\tau - \Delta\tau), X^n(\tau)] = \Phi[Z(\tau - \Delta\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)]. \quad (2)$$

где $Z(\tau)$ – вектор параметров состояния соответствующей подсистемы;

Φ – закон отображения, отражающий связь между подсистемами технологической системы;

$X(\tau)$ – вектор входных сигналов соответствующей подсистемы;

$w^n(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий;

$u^n(\tau)$ – вектор управляющих воздействий;

$x^n(\tau)$ – вектор входных параметров, n – номер производной.

Применительно к рисунку 1, процесс внутреннего шлифования может быть представлен следующим образом:

$$Y(\tau) = \Phi[Z(\tau), X^n(\tau)] = \Phi[Z(\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)]. \quad (3)$$

$$Y_{i(j)} = \Phi[Z_{i(j)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}]. \quad (4)$$

Значения параметров в выражениях (1), (2), (3), (4) могут меняться с учетом наложенных связей (типа равенств) и в определенных границах:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{a_j} = \Phi^2(R_{a_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ R_{\max_j} = \Phi^3(R_{\max_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ D_{k_j} = \Phi^3(D_{k_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ T_{\max_j} = \Phi^3(T_{\max_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ H_{d_j} = \Phi^3(H_{d_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ \dots\dots\dots \\ \delta_{cb_j} = \Phi^3(\delta_{cb_{j-1}}, u_j, w_j, x_j) \\ \Pi_j = \Phi^3(\Pi_{j-1}, u_j, w_j, x_j) \end{array} \right. \quad (5)$$

где R_{a_j} – величина шероховатости R_a на j -м обороте;

$R_{\max_j}$ – величина шероховатости $R_{\max}$ на j -м обороте;

D_{k_i} – диаметр шлифовальной головки на j -м обороте;

$T_{\max}$ – максимальная температура в зоне резания j -м обороте;

H_{d_i} – диаметр отверстия в заготовке;

P_j – припуск, оставшейся к j -му обороту;

$$\delta_{cbj}$$
 – глубина профиля инструмента на j -м обороте.

Для характеристики критического значения вектора параметров состояния $Z_{kpi(j)}$ при шлифовании могут быть использованы следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{a_j} \leq R_{a_{\partial on}} + \Pi_j; \\ R_{\max_j} \leq R_{\max_{\partial on}} + \Pi_j; \\ T_{\max} \leq K_T T_{\kappa p}; \\ \delta_{cb_j} \leq \delta_{cb_{\partial on}} \\ \dots\dots\dots \\ 0 \leq u^n \leq u_{\partial on}^n \end{array} \right. \quad (6)$$

где $T_{\max}$ – максимальная температура в зоне резания;

T_{kp} – критическая температура структурно-фазовых превращений материала детали;

K_T – коэффициент, учитывающий степень понижения температуры;

u_{don}^n – максимально допустимые значения управляющих воздействий, генерируемых оборудованием.

Стабильность параметров качества поверхностей на операции внутреннего шлифования в существенной степени зависит от изменения фактической глубины микрорезания t_f , которая с одной стороны представляет связующее звено между выходными параметрами процесса и управляющими воздействиями, с другой стороны определяет важнейшие ограничения

$$0 \leq t_{f_i} \leq \delta_{cb_j}. \quad (7)$$

Вывод. Основным принципом системного анализа является разделение сложного процесса на совокупность простых, учитывая их взаимосвязи. Таким образом, системный анализ выступает как процесс последовательной декомпозиции рассматриваемой сложной проблемы на взаимосвязанные частные проблемы и последующую их комплексную оценку.

После декомпозиции операции внутреннего шлифования для описания поведения каждой полученной подсистемы с учетом прямых и обратных связей были получены функции переходов и выходов, позволяющие установить взаимосвязи режимов обработки с текущими параметрами зоны контакта при внутреннем шлифовании.

Однако, для оценки взаимодействия подсистем необходимо более детально рассматривать особенности контакта шлифовального инструмента и заготовки при внутреннем шлифовании.

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.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.
3. Часовитина, А. С. Повышение эффективности обработки точных отверстий в деталях из титана и титановых сплавов на операциях чистового и тонкого шлифования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Часовитина Анастасия Сергеевна, 2024. – 172 с.
4. Вожжов А.А. Особенности формирования погрешностей шаговых параметров профиля поверхности при резбонарезании Вожжов А.А., Гречко В.А. Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2021. № 3 (15). С. 62-68.

УДК 621.993

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЮЩИХ МЕТЧИКОВ

*А.О. Харченко¹,
Д.Е. Сидоров¹,
В.О. Лазуткин¹*

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

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований в направлении повышения эффективности процесса изготовления рабочей части мелкогабаритных пластически деформирующих метчиков (ПДМ). Основной причиной, сдерживающей широкое внедрение метода пластической деформации для получения внутренних резьб малых диаметров, является действующая технология изготовления резьбового профиля на метчиках, которая не всегда обеспечивает нормативную стойкость инструмента и качество получаемых внутренних резьб. Целью работы является обоснование и развитие перспективных процессов изготовления метчиков на основе прогрессивных способов формирования их рабочей части. В статье рассмотрены и проанализированы способы формирования рабочей части ПДМ путем предварительного профилирования заготовки с получением на её боковой поверхности рельефа и последующего профилирования радиальным обжимом полученной заготовки по локальным участкам. Анализ и разработка прогрессивных способов изготовления рабочей части пластически деформирующих метчиков позволяют повысить эффективность обработки внутренней мелкогабаритной резьбы в деталях из алюминиевых, цинковых, медных сплавов, конструкционных сталей и титановых сплавов. При этом трудоемкость изготовления

существенно ниже, чем по традиционной технологии, стоимость примерно на порядок меньше стоимости метчиков со шлифованным резьбовым профилем, а стойкость – более, чем в 2 раза выше.

Ключевые слова: мелкоразмерная резьбообработка, наружная резьба, рабочая часть пластически деформирующих метчиков, накатывание наружных резьб, способ формирования рабочей части.

IMPROVEMENT OF METHODS FOR MANUFACTURING THE WORKING PART OF PLASTIC DEFORMING TAPS

A.O. Kharchenko¹,

D.E. Sidorov¹,

V.O. Lazutkin¹

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

ABSTRACT

The article presents the results of research in the direction of improving the efficiency of the manufacturing process of the working part of small-sized plastic deforming taps (PDT). The main reason hindering the widespread introduction of the plastic deformation method for obtaining internal threads of small diameters is the current technology for manufacturing a threaded profile on taps, which does not always ensure the normative durability of the tool and the quality of the resulting internal threads. The purpose of the work is to substantiate and develop promising processes for manufacturing taps based on progressive methods of forming their working part. The article discusses and analyzes the methods of forming the working part of the PDT by pre-profiling the workpiece to obtain a relief on its side surface and subsequent profiling by radial crimping of the resulting workpiece in local areas. The analysis and development of progressive methods for manufacturing the working part of plastic deforming taps make it possible to increase the efficiency of processing internal small-sized threads in parts made of aluminum, zinc, copper alloys, structural steels and titanium alloys. At the same time, the complexity of manufacturing is significantly lower than according to traditional technology, the cost is about an order of magnitude less than the cost of taps with a polished threaded profile, and the durability is more than 2 times higher.

Keywords: small-size threading, external thread, working part of plastic deforming taps, rolling of external threads, method of forming the working part.

Введение. В современном машиностроении, особенно в таких его отраслях, как приборостроение и электротехническая промышленность, более 60% выпускаемых изделий содержат резьбовые соединения. Наиболее прогрессивным, а иногда и единственно возможным, методом получения резьбовой поверхности в алюминиевых и титановых материалах является метод пластического деформирования бесстружечными метчиками [1].

Накатывание резьбы по сравнению с резбонарезанием способствует повышению производительности труда, экономии металла и значительному повышению долговечности деталей [1, 2, 3, 4].

В инструментальной промышленности под мелкоразмерным понимают разнообразный инструмент диаметром до 12 мм [5, 6] в зависимости от того, где его применяют. В частности, в классе метчиков мелкоразмерными считаются метчики М1...М6. При мелкоразмерной обработке внутренних резьб во всех типах производства преобладает метод обработки резьб метчиками. При этом для труднообрабатываемых материалов, таких, как алюминиевые и

титановые сплавы, а также жаропрочные литейные сплавы, наиболее перспективным является метод пластического формообразования внутренних резьб пластически деформирующими или режуще-деформирующими метчиками.

Сдерживающей широкое внедрение метода пластической деформации для получения мелкоразмерных внутренних резьб причиной является сложная существующая технология изготовления затылованного резьбового профиля на метчиках. При этом не всегда обеспечивается нормативная стойкость инструмента и качество получаемых внутренних резьб [7, 8, 9, 10].

Цель исследования: обоснование и развитие перспективных способов изготовления метчиков на основе прогрессивных методов формирования их рабочей части. Целесообразно рассмотрение новых процессов формообразования и затылования резьбы на рабочей поверхности метчиков, выработка рекомендаций по применению прогрессивных способов для их реализации с учетом опыта, накопленного исследователями и разработчиками в этой области.

Основная часть. Анализ литературных данных показывает, что при обработке наружных резьб в производстве крепежных деталей преобладают методы накатывания, и главным среди них является метод накатывания резьб плоскими плашками. Технологические характеристики наиболее распространенных методов накатывания наружных резьб представлены в таблице 1, где указан диапазон обрабатываемых резьб, а также необходимая величина сбега, максимальная твердость заготовки, степень точности и максимально достижимая производительность, относящаяся лишь к наиболее благоприятным условиям обработки (к резьбам малых диаметров). Такие таблицы и диаграммы на их основе облегчают предварительный выбор оптимального метода обработки резьб [6], уменьшая диапазон поиска при проектировании, ограничиваясь подробным рассмотрением минимально необходимых методов обработки резьбы с заданным расположением поверхности.

Таблица 1. Характеристика методов пластического деформирования (накатывания) при обработке наружных резьб

Метод накатывания наружных резьб	Диаметр, мм	Шаг P , мм	Максимальная длина, мм	Максимальная величина сбега, мм	Максимальная твердость заготовки HRC	Степень точности	Максимально достижимая производительность, шт/мин
Планетарное	1,6...27	0,4...2,5	100	$2P$	32	2...6	1500
Плоскими плашками	2...70	0,25...3	250	$1,5 P$	32	6...8	600
Двумя (тремя) роликами	2...250	0,35...20	15000	P	32	2...6	200
Аксиальными головками	1,4...150	0,35...8	6000	$1,5 P$	32	4...7	100
Тангенциальными головками	3...52	0,5...2,5	20	P	24	4...7	20

При пользовании таблицами следует учитывать, что методы обработки постоянно развиваются и совершенствуются в направлении расширения их технологических возможностей, что периодически должно уточняться. В работах [11, 12] приведено описание метода обработки, предлагаемого для получения наружной резьбы на рабочей части мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков (ПДМ).

Как показывают опыт работы предприятий машино- и приборостроения, а также комплекс исследований, проведенных в Севастопольском государственном университете (СевГУ), основной причиной сдерживания внедрения метода пластической деформации для внутренней мелкоразмерной резьбообработки является существующая технология изготовления затылованного резьбового профиля на метчиках с требуемой нормативной стойкостью и высоким качеством внутренних резьб, получаемых такими метчиками [7, 11, 12].

Увеличение эксплуатационных характеристик пластически деформирующих метчиков (ПДМ) возможно на основе реализации прогрессивных способов получения на их рабочей части затылованного резьбового профиля.

Поперечное сечение рабочей части ПДМ рекомендуется выполнять трех- или четырехгранным. Четырехгранное поперечное сечение обладает повышенной прочностью и упрощает контроль исполнительных размеров рабочей части. На рабочей части ПДМ выполняется резьба по всему периметру поперечного сечения. Для обеспечения поступления смазки в зону деформации, а также выхода воздуха и смазки при образовании резьбы в глухих отверстиях на боковых сторонах рабочей части ПДМ выполняются канавки, параллельные оси метчика, ширина и радиус которых получаются автоматически одновременно с образованием резьбового профиля на рабочей части.

Форма поперечного сечения ПДМ определяется конфигурацией и размерами поперечного сечения заготовок (рисунок 1, а, б).

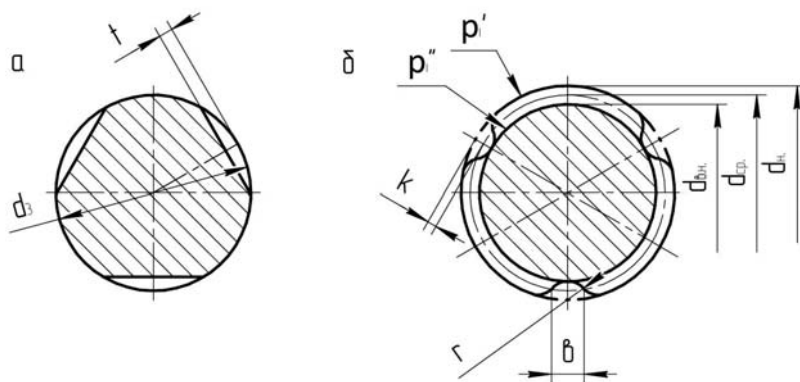


Рисунок 1. Поперечные сечения рабочей части трехгранных заготовок ПДМ: а – начальное, перед формированием резьбового профиля; б – после накатывания резьбового профиля на рабочей части

Образование резьбового профиля на ПДМ производится пластическим деформированием (накатыванием) и геометрия его обуславливается в основном геометрией накатного инструмента.

Формообразование резьбового профиля с одновременным его затылованием на рабочей части ПДМ осуществляется на универсальных токарно-винторезных станках резьбонакатными головками с пружинящим корпусом и головками специальных конструкций.

Заготовке 1 (рисунок 2) ПДМ сообщают вращение, а резбонакатной головке – продольное перемещение так, чтобы между этими движениями обеспечивалась жесткая кинематическая связь. Резбонакатные ролики 2 в процессе накатывания постоянно контактируют с поверхностями рабочей части, периодически поднимаясь на вершины граней поперечного сечения и опускаясь во впадины граней. При этом течение металла происходит не только вдоль боковых поверхностей профиля резбонакатных роликов, но и с вершин граней заготовки ПДМ во впадины. Образуется полный резьбовой профиль на вершинах граней, а впадины служат смазочными канавками по всей длине рабочей части.

После того, как накатана вся рабочая часть, реверсируют движение и «свинчивают» резбонакатную головку с рабочей части ПДМ. Формообразование резьбового профиля накатыванием обеспечивает стабильность размеров резьбы рабочей части ПДМ, так как «лишний» металл перемещается в лыски заготовки ПДМ и при $f = 0,08$ (f – коэффициент, определяющий форму поперечного сечения рабочей части ПДМ) изменяется лишь ширина в смазочной канавке. Это позволяет расширить поле допусков на диаметры заготовок ПДМ.

Разработанная в СевГУ технология изготовления ПДМ включает формообразование стержня ПДМ, поперечного сечения рабочей части, резьбового профиля и термообработку.

Стержни цельных ПДМ в зависимости от программы выпуска и имеющегося оборудования могут быть изготовлены на универсальных токарных станках, станках с ЧПУ или автоматах продольного точения. Форму граненого поперечного сечения ПДМ получают фрезерованием, шлифованием или штамповкой соответственно на широкоуниверсальных, фрезерных, плоскошлифовальных станках или кривошипных прессах.

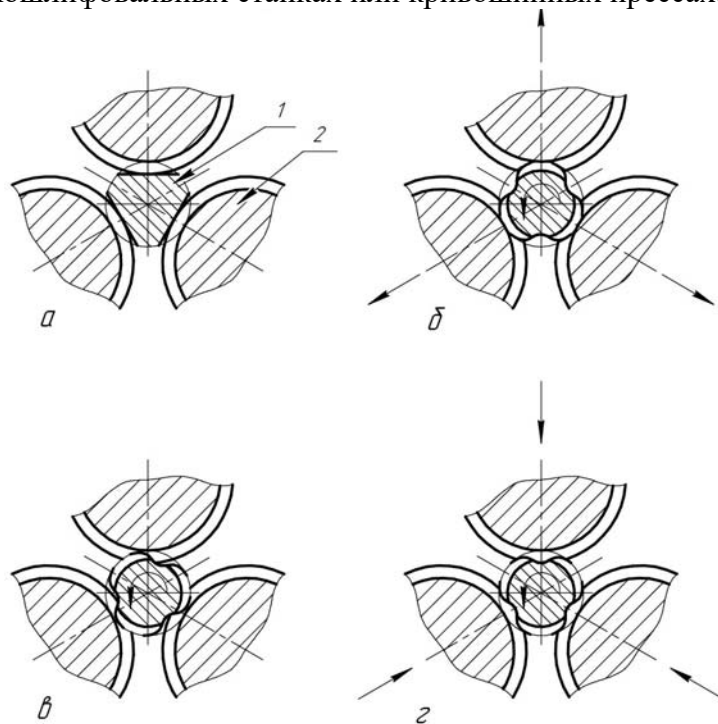


Рисунок 2. Схема способа (авт. свид. SU 1065069) образования затылованного резьбового профиля на рабочей части ПДМ: а – исходное состояние заготовки ПДМ и резбонакатных роликов; б – вращение заготовки и согласованное продольное перемещение резбонакатной головки к вершинам граней; в – продолжение указанных перемещений резбонакатной головки с обеспечением затылования профиля; г – продолжение указанных перемещений резбонакатной головки ко впадинам граней с обеспечением формирования смазочных канавок

Формообразование резьбового профиля с одновременным его затылованием на рабочей части ПДМ осуществляется на универсальных токарно-винторезных станках резьбонакатными головками с пружинящим корпусом и головками специальных конструкций. Термическая обработка ПДМ является окончательной операцией, после которой резьба должна быть чистой, без разъеданий и обезуглероживания, а размеры элементов резьбы должны находиться в пределах допускаемых отклонений. Твердость резьбовых поверхностей ПДМ после закалки не должна превышать заданной величины HRC 60...63, так как изгибающие усилия, возникающие на сторонах профиля витков, могут вызвать их выкрашивание.

Заключение. Таким образом, анализ и разработка прогрессивных способов изготовления рабочей части пластически деформирующих метчиков позволяют повысить эффективность обработки внутренней мелкоразмерной резьбы в деталях из алюминиевых, цинковых, медных сплавов, конструкционных сталей и титановых сплавов. Изготовленные для размера М4 из заготовки круглого поперечного сечения рабочей части диаметром $d_3 = 3,34$ мм с фрезерованными четырьмя лысками глубиной $t = 0,2$ мм и последующим накатанным резьбовым профилем, а также затылуемым деформированием матрицей и пуансоном, готовые метчики с размерами рабочей части $d_n = 4,03$ мм и $d_{ср.} = 3,67$ мм обеспечивают высокую точность и твердость рабочей части инструмента. При этом трудоемкость изготовления существенно ниже, чем по традиционной технологии, стоимость примерно на порядок меньше стоимости метчиков со шлифованным резьбовым профилем, а стойкость – более, чем в 2 раза выше. Внедрение прогрессивных способов получения мелкоразмерных ПДМ в производство существенно повышает производительность труда и снижает затраты на изготовление инструмента.

Список литературы

1. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
2. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
3. Миропольский Ю.А. Накатывание резьб и профилей / Ю.А. Миропольский, Э.П. Луговой. – М.: Машиностроение, 1976. – 178 с.
4. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Стешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
5. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
6. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
7. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
8. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
9. Харченко А.О. Патентоведение и изобретательство. Практикум / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.

10. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении /А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

11. Харченко А.О. Повышение эффективности формирования резьбы при изготовлении мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков / А.О. Харченко, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2022. № 5 (355). – С.120-129. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-120-129.

12. Харченко А.О. Прогрессивное оборудования для получения рабочей части мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков / А.О. Харченко, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2022. № 5 (355). – С.158-164. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-158-164.

УДК 621.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИБРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

*Е.А. Левченко¹,
Л.Л. Новиков¹*

*¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь,
Российская Федерация*

АННОТАЦИЯ

Применение отделочных методов обработки поверхностей деталей с вибрационным, тепловым, химическим и электрическим воздействием определяет новые виды обработки, отличающиеся наибольшей эффективностью. Одним из перспективных направлений развития процессов металлообработки является разработка и внедрение качественно новых технологий, в том числе основанных на воздействии нескольких видов энергии или совмещении различных способов ее подвода.

Выполнение операций резания металлов с вибрациями на оптимальных режимах позволяет успешно решать многие актуальные проблемы, стоящие перед машиностроительной промышленностью.

Среди большого числа важнейших практических проблем, поставленных перед специалистами, выделяются такие, которые связаны с исследованием геометрических и физических особенностей обработанных поверхностей. Необходимо отметить, что взаимосвязь физико-механического состояния обработанной поверхности с технологическими факторами и характеристиками эксплуатационных свойств деталей машин изучена недостаточно.

Ключевые слова: ультразвуковые воздействия, качество обработанной поверхности, виброабразивная обработка.

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER AND OPERATIONAL PROPERTIES OF PARTS DURING VIBROABRASIVE PROCESSING USING ULTRASONIC

*E.A. Levchenko*¹,

*L.L. Novikov*¹

¹ *Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation*

ABSTRACT

The use of finishing methods for surface treatment of parts with vibration, thermal, chemical and electrical effects determines new types of treatment that are distinguished by the greatest efficiency. One of the promising areas of development of metalworking processes is the development and implementation of qualitatively new technologies, including those based on the impact of several types of energy or a combination of different methods of its supply.

Performing metal cutting operations with vibrations in optimal modes allows us to successfully solve many urgent problems facing the mechanical engineering industry.

Among the large number of the most important practical problems posed to specialists, those related to the study of the geometric and physical characteristics of the treated surfaces stand out. It should be noted that the relationship between the physical and mechanical state of the treated surface with technological factors and characteristics of the operational properties of machine parts has not been sufficiently studied.

Keywords: ultrasonic effects, quality of treated surface, vibroabrasive treatment.

Введение. Как известно, качество поверхности деталей машин занимает одно из важнейших мест в сфере современного машиностроения. Обработка металлов резанием существенно изменяет эксплуатационные свойства деталей, прежде всего за счет формирования определенного качества поверхностного слоя, от которого зависит прочность деталей, исполнение ими своего служебного назначения, особенно при знакопеременных нагрузках, прочность пресовых и стабильность подвижных посадок, износостойкость, коэффициент трения, коррозионная прочность, оптические свойства и эрозионная стойкость.

В настоящее время можно считать установленным, что зарождение и развитие различных форм структурной повреждаемости, приводящей к отказам, в основном определяется особенностями поведения поверхностных слоев изделий в процессе эксплуатации. Поэтому наряду с производительностью и точностью обработки, качество поверхностного слоя и связанные с ним эксплуатационные характеристики деталей машин и инструмента являются важнейшими технологическими показателями эффективности функционирования системы механической обработки [2].

Основная часть. Проведенные лабораторные исследования и анализ результатов производственного внедрения показывают, что вибрационное резание с наложением ультразвука зачастую приводит к повышению обрабатываемости металлов резанием (в том числе нержавеющей и жаропрочных). Процесс вибрационной обработки с ультразвуком на оптимальных режимах способствует уменьшению интенсивности износа инструмента из-за снижения действующих сил и улучшению показателей качества обработанной поверхности. Переход на обработку резанием с вибрациями в ряде случаев обеспечивает улучшение показателей виброустойчивости технологической системы и таким образом повышение производительности и точности обработки. Использование вибраций, задаваемых извне

механическим вибратором, может приводить к улучшению условий пластического деформирования и трения, и, тем самым, к снижению значений составляющих силы резания. Данные обстоятельства свидетельствуют о наличии взаимосвязи между кинематикой процесса вибрационного резания, напряженным состоянием, пластическими деформациями, трением, силой резания и тепловыми явлениями [1].

Наряду с физико-механическим состоянием важным функциональным показателем качества поверхностного слоя является макро- и микрогеометрия обработанной поверхности, которая от воздействия вибраций может сохраняться практически неизменной или претерпевать изменения в сторону улучшения. Проведенные ранее исследования свидетельствуют о тесной связи геометрических параметров поверхности с эксплуатационными характеристиками изделий, в том числе износостойкостью, контактной выносливостью, усталостной прочностью и др. В зависимости от конкретных условий обработки вклад шероховатости поверхности в снижении сопротивления усталости жаропрочных сплавов может достигать 50% [4].

Определенный интерес представляет изучение влияния параметров процесса резания на шероховатость обработанной поверхности и наклеп поверхностного слоя.

С целью получения количественных зависимостей показателей качества поверхностей от режимов обработки были проведены лабораторные исследования по виброабразивной обработке плоских заготовок из сталей ХН70Ю и 20Х13. В качестве варьируемых факторов, характеризующих условия обработки, были приняты: режущий инструмент: фарфоровые шары, диаметр 5 мм; металлические шары, диаметр 5 мм; стеклянные шары, диаметр 5 мм, скорость подачи заготовки – $V_3 = 50 \dots 250$ мм/мин, ширина обрабатываемой плоскости – $B = 50 \dots 70$ мм, глубина резания – $a = 2 \dots 4$ мм, частота поперечных ультразвуковых колебаний заготовки – $f = 16 \dots 20$ кГц, амплитуда – $\xi = 6 \dots 12$ мкм.

Как видно из (рис. 1) при виброабразивной обработке заготовок из сталей ХН70Ю и 20Х13 введение в зону резания колебаний ($\xi = 6$ мкм) в диапазоне малых подач снижает высоту микронеровностей примерно в 1,3-1,5 раза. Проведенные исследования показали, что дальнейшее увеличение амплитуды колебаний ($\xi > 12$ мкм) сопровождается увеличением шероховатости. С увеличением скорости подачи эффективность ультразвука снижается, и при $S = 250$ мм/мин высота микронеровностей при обычной виброобработке и ультразвуковой практически одинакова [3].

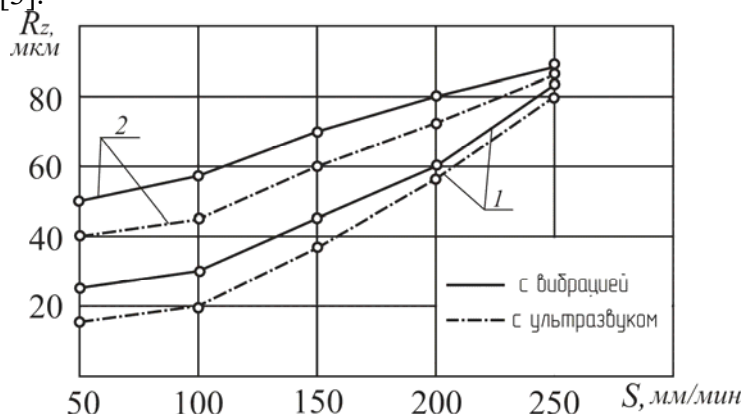


Рисунок 1. Влияние ультразвука на шероховатость обработанной поверхности: 1 – сталь ХН70Ю; 2 – сталь 20Х13 ($V_0 = 52$ м/с; $B = 60$ мм; $a = 2$ мм; $\xi = 6$ мкм; $f = 18$ кГц)

Численные значения показателей пластической деформации часто помогают раскрыть возможности последующей обработки деталей и дают представление об их эксплуатационных свойствах. В деталях машин, подверженных циклическим высоким нагрузкам, напряжения достигают максимальных значений в поверхностных слоях, и поэтому знание величины и знака остаточных напряжений, возникающих при механической обработке, очень важно.

При виброобработке поверхностей с наложением ультразвука изменяется напряженное состояние в зоне резания, а знак остаточных напряжений поверхностного слоя определяется знаком напряженного состояния обрабатываемой поверхности в процессе резания.

Как известно [1] процесс пластической деформации сопровождается интенсивным растяжением материала, формирующего поверхностный слой, что приводит к образованию зоны растягивающих напряжений, определяемых деформациями сдвига и сжатия.

Возникновение остаточных сжимающих напряжений повышают сопротивляемость деталей машин усталостному разрушению и значительно увеличивает ресурс работы детали. Так, образование на участках деталей, работающих на растяжение, остаточных сжимающих напряжений резко повышает механические свойства поверхностного слоя, способствует существенному повышению сопротивления усталостному разрушению малопластичных и твердых сталей. Напротив, остаточные напряжения растяжения резко понижают эксплуатационные характеристики деталей.

Известно, что пластическая деформация с полным упрочнением осуществляется при низких температурах [4]. В процессе вибрационного резания в зоне контакта инструмента и заготовки развивается высокая температура, и наряду с процессом наклепа происходит разупрочнение, приводящее к частичному, а иногда и к полному снятию образовавшегося наклепа. Интенсивность разупрочнения зависит от продолжительности процесса деформации, а скорость – от температуры. Необходимо отметить, что увеличение скорости вращения шара повышает температуру резания и способствует интенсивности процесса разупрочнения.

Скорость подачи оказывает влияние на величину составляющих силы резания, степень деформирования металла и температуру процесса пластического деформирования. Изменение подачи приводит к развитию процесса наклепа, а изменение температуры обуславливает действие процесса разупрочнения [5-7].

Результаты исследований показали (рис. 2), что при виброобработке в деталях из стали ХН70Ю в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения. Введение в зону резания ультразвуковых колебаний существенно изменяет характер формирования остаточных напряжений. Как видно из рис. 2 эффективность воздействия ультразвука зависит от амплитуды колебаний. При $\xi = 6$ мкм величина остаточных напряжений снижается в 1,4 раза по сравнению с обычным виброрезанием, а при $\xi = 12$ мкм наблюдается рост напряжений. Следует, однако, отметить, что указанная тенденция проявляется по-разному в зависимости от режимов резания, и в частности от скорости вращения шара и подачи заготовки.

Таким образом, изменяя скорости вращения шара и подачи заготовки, а, следовательно, силу резания и температуру в зоне стружкообразования, можно регулировать степень и глубину наклепа поверхностного слоя металла.

Введение в зону резания ультразвуковых колебаний оказывает существенное влияние на работоспособность не только лезвийного, но и абразивного инструмента.

Независимо от принятой технологической схемы и вида абразивного материала общей тенденцией является увеличение расхода абразивного инструмента по сравнению с обычной обработкой. В большей степени эта закономерность проявляется в начальный период обработки, когда при прочих равных условиях расход инструмента увеличивается пропорционально амплитуде и частоте колебаний.

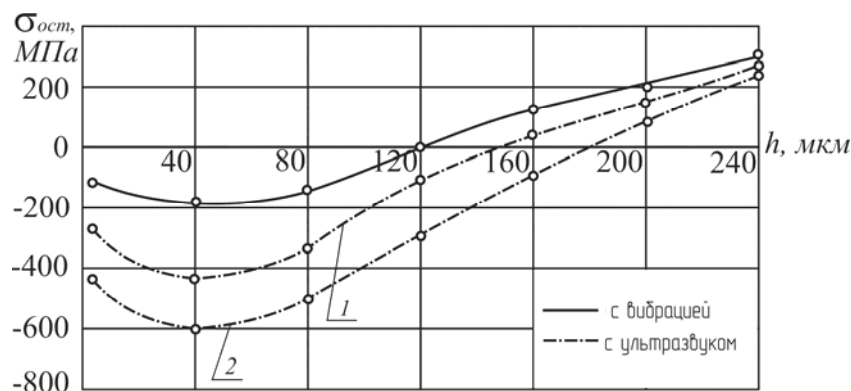


Рисунок 2. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя при обычной вибрационной обработке и с ультразвуком стали ХН70Ю: 1 – $\xi = 6$ мкм; 2 – $\xi = 12$ мкм ($V_d = 52$ м/с; $V_z = 150$ мм/мин; $B = 60$ мм; $a = 2$ мм)

В дальнейшем наличие этих показателей уменьшается и в конце периода стойкости расход при обычной обработке может превышать соответствующий показатель ультразвукового резания. Наибольший расход абразивного инструмента (по сравнению с обычной обработкой) наблюдается при радиальных колебаниях, наименьший – при осевых. Использование оптической и электронной микроскопии позволило установить, что указанная особенность расхода абразивных инструментов обусловлена воздействием ультразвуковых колебаний на характер износа и разрушения режущих зерен.

При обычной обработке жаропрочного сплава ХК77ТЮР и титановых сплавов ВТ8 и ВТ22 для топографии площадки износа характерен слабовыраженный микрорельеф со следами обрабатываемого материала в виде налипов и наволакиваний, а также множественные осповидные микрократеры, которые можно идентифицировать как очаги адгезионного взаимодействия. При этом межзеренное пространство в основном свободно от отходов шлифования.

Снижение режущих свойств абразивных инструментов при обработке стали 8Х4В9Ф2Ю и 3ОХГСНА также сопровождается образованием сглаженных площадок износа, однако, в отличие от указанных выше материалов в этом случае следы взаимодействия выражены не столь отчетливо, а межзеренное пространство заполнено отходами обработки (рис.3).

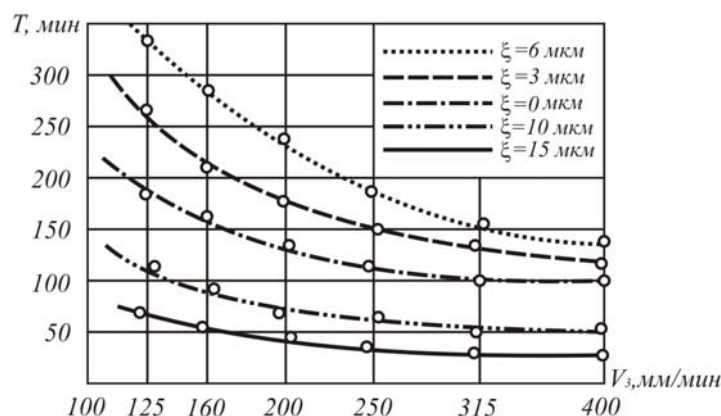


Рисунок 3. Влияние скорости обработки на стойкость инструмента с наложением ультразвука

Введение в зону резания радиальных ультразвуковых колебаний соответственно изменяет не только характер износа, но и топографию изношенной поверхности. Как видно из рис.3, независимо от обрабатываемого материала последняя характеризуется развитым рельефом, состоящим из множества элементарных режущих кромок, образованных в результате микро- и субмикросколов (выкрашивания) рабочей части абразивных зерен. Наряду с этим наблюдаются фрагменты диспергированных зерен практически без следов износа, зерна с трещинами различных размеров и системой микротрещин, а также лунки, оставшиеся от зерен, покинувших связку. Межзеренное пространство свободно от стружки и отходов обработки, на рабочей части зерен отсутствуют налипы и резко уменьшается количество очагов взаимодействия, в том числе при обработке жаропрочных и титановых сплавов.

С увеличением амплитуды расход абразивного инструмента возрастает и при $\xi > 15$ мкм значительно превышает значения, характерные для обычной обработки. При этом наряду с микроскалыванием и объемным разрушением зерен происходит их расшатывание и выпадение а связки уже в начальный период взаимодействия. Такой характер расхода следует считать недопустимым, поэтому амплитуда колебаний при ультразвуковой абразивной обработке не должна превышать 4 - 6 мкм при радиальных колебаниях и 6-8 мкм – при тангенциальных и осевых. В указанном диапазоне амплитуд абразивные инструменты работают весь цикл обработки в режиме равномерного самозатачивания и непрерывной регенерации рабочих поверхностей, что в конечном итоге является одной из основных причин их высоких режущих свойств. Отмеченные особенности воздействия ультразвука на режущий аппарат режущих инструментов хорошо согласуются с результатами моделирования изнашивания и разрушения абразивных зерен в ультразвуковом поле и позволяют рассматривать применение ультразвука как один из эффективных методов управления режущей способностью абразивного инструмента непосредственно в процессе обработки.

Как показали предварительные исследования, наряду с изменениями характера износа абразивных зерен и их топографии повышение абразивной способности инструмента при введении в зону резания ультразвуковых колебаний обусловлено увеличением числа активных зерен, участвующих в работе. Определение этого показателя на основе теоретико-вероятностных методов или путем регистрации импульсов ТЭДС в условиях ультразвуковой обработки не всегда обеспечивает необходимую сопоставимость результатов. Поэтому сравнительную оценку числа активных зерен при обычном и ультразвуковом резании производили путем моделирования взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемым материалом, в качестве которого использовали полированные медные образцы ($Ra = 0,16-0,32$).

Статистический анализ полученных данных показал, что при высокочастотном циклическом нагружении в результате периодического другого формоизменения связки, а такие увеличения глубины внедрения отдельных зерен, средне-вероятностное число активных зерен при $\xi = 4-5$ мкм увеличивается на 40-60%. Характерно, что одинаковое с обычным нагружением число активных зерен при введении в зону контакта ультразвуковых колебаний может быть получено при удельных давлениях в 3-3,5 раза более низких, что свидетельствует о возможности эффективного использования ультразвука при виброабразивной обработке маложестких и тонкостенных деталей.

При тангенциальных и осевых колебаниях также наблюдается тенденция к увеличению числа активных зерен, однако в данном случае влияние ультразвука проявляется не столь заметно.

Изучение влияния ультразвуковых колебаний на режущую способность (производительность) абразивных инструментов позволило установить, что общей, закономерностью различных процессов ультразвуковой абразивной обработки является то, что

съем металла носит независимый характер, продолжается весь цикл обработки и со временем практически не меняется. Влияние времени обработки на режущую способность инструмента при шлифовании, хонинговании и суперфинишировании. В начальный период обработки производительность обычного и ультразвукового шлифования примерно одинакова и составляет 150-180 мм³/мин. В дальнейшем интенсивность съема при обычном шлифовании падает и через 20 мин составляет 70 мм³/мин. При ультразвуковом шлифовании съем металла практически не изменяется и в конце цикла почти в 3 раза превышает чем при обычных условиях обработки.

Значительное повышение коэффициента шлифования установлено и при ультразвуковом шлифовании эльборными кругами. Так, при плоском шлифовании титанового сплава ВТ9 с радиальными колебаниями ($\xi \leq 5$ = мкм, $f = 21$ кГц) коэффициент шлифования увеличился в 4,2 раза по сравнению с обычной обработкой. При шлифовании с тангенциальными и поперечными колебаниями в аналогичных условиях указанный показатель увеличился соответственно в 2,8 и 2,2 раза. При шлифовании сплава ВТ22 эффективность ультразвукового воздействия ниже хотя в этом случае режущая способность инструмента при радиальных колебаниях повышается примерно в 3 раза.

Выводы. Формирование показателей качества поверхности при виброабразивной обработке зависит от параметров режима резания и физико-механических свойств обрабатываемых материалов. Рациональное применение ультразвука при обработке заготовок позволяет достичь улучшения эксплуатационных характеристик деталей, аналогично тому, как имеет место после выполнения специальных упрочняющих операций.

Список литературы

1. Pokintelitsa N. The Study of the Kinetics of the Protective Coating Formation in the Mechanochemical Vibrational / N. Pokintelitsa, E. Levchenko/ Materials Today: Proceedings Volume 11, Part 1, 2019, Pages 543-547 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.026>.
2. Левченко Е.А. Анализ динамики процесса обработки деталей с использованием вибраций / Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Вып. № 1. – С. 26 – 30.
3. Левченко Е.А. Исследование зависимости динамических и технологических параметров процесса обработки деталей с вибрациями / Е.А. Левченко// Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Вып. № 2. – С. 44 – 48.
4. Богомолов Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна. / Н.И. Богомолов Труды ВНИИАШ. – М.–Л.: Машиностроение, № 7, 1968. – С. 74 –87.
5. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих элементов абразивных зерен шлифовального круга. / А.М. Вульф, А.В. Мурдасов // Науч. техн. реф. сб. «Абразивы», – М.: НИИМАШ, – 1968, вып. 1.
6. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак // – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.

УДК 621.95

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТВОДА ИЗ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА С ВНУТРЕННИМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Э. Р. Ваниев¹,
Л.Т. Абдуразаков¹,
Р.К. Кавляметов¹

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

АННОТАЦИЯ

В статье представлены разработки и результаты исследования влияния конструктивных решений на теплоотвод при точении резцом с внутренним воздушным охлаждением. Разработана конструкция резца с увеличенным теплоотводом. Она позволяет существенно расширить область использования резцов с внутренним воздушным охлаждением вместо традиционных резцов с охлаждением СОЖ.

Ключевые слова: Резец, точение, температура, COTC, SOLIDWORKS, параметры шероховатости, режимы резания.

INCREASED HEAT DISSIPATION FROM THE CUTTING ZONE DURING TURNING BASED ON THE USE OF AN AIR-COOLED TOOL

Eldar R. Vaniev¹,
Lemar T. Abdurazakov¹,
Rudmir K. Kavlyametov¹,

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

ABSTRACT

This master's thesis presents the developments and results of a study of the influence of design solutions on heat removal when turning with a cutter with internal air cooling. A cutter design with increased heat sink has been developed. It allows you to significantly expand the scope of use of cutters with internal air cooling instead of traditional cutters with coolant.

Keywords: Cutter, turning, temperature, LCTE, SOLIDWORKS, roughness parameters, cutting modes.

Введение. Одним из основных проблем механической обработки металлов является значительное повышение температуры в зоне резания. Большая ее часть переходит в стружку, однако даже небольшая ее доля (от 5 до 20%), которая передается инструменту, может вызвать значительный нагрев контактных поверхностей и режущей кромки до 1000°C и выше [1]. Высокая температура негативно влияет на износостойкость инструмента и связанные с ней точность и качество обработки детали.

Большинство существующих способов снижения температуры в зоне резания основывается на использовании смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Современные СОЖ при испарении, а также в результате непосредственного контакта с кожей рабочего или контакта через спецодежду могут оказывать на него токсическое воздействие [2].

В настоящее время для повышения экологической безопасности металлообработки разрабатывают новые марки СОЖ, в которых токсичные компоненты заменяются на менее вредные. Однако и новые экологичные марки не лишены отрицательных медико-биологических свойств. В связи с этим в последние годы в качестве средства охлаждения инструмента все чаще начинают использовать сжатый воздух [3].

Как правило, струю воздуха направляют непосредственно на переднюю или заднюю поверхность инструмента, как можно ближе к режущему лезвию. Эффект охлаждения при этом достигается, но повышается опасность поражения рабочего и засорения механизмов металлорежущего станка разлетающейся стружкой, и далеко не всегда различные конструктивные решения позволяют предотвратить ее разлетание [4]. В этой связи перспективным способом является охлаждение инструмента воздухом изнутри [5].

Одним из рациональных вариантов токарных резцов с внутренним воздушным охлаждением является специально разработанный резец. Он состоит из полый державки с механическим креплением к ней режущей пластины, под которой расположена теплопроводная медная вставка. На заднем торце державки закреплен штуцер для подвода сжатого воздуха, к которому прикрепляется медная трубка, проходящая с зазором вдоль полости державки. На поверхность полости нанесено медное покрытие, соединенное со вставкой. Воздух подается в центральное отверстие штуцера, а выходит в атмосферу через расположенные по периметру штуцера отверстия.

Для определения эффективности разработанного резца было проведено специальное исследование. Определено, что при установившейся тепловой нагрузке 17 Ватт, приложенной к вершине резца с охлаждением сжатым воздухом давлением 0,6 МПа, максимальная температура через 900 сек. оказалась на 314° меньше, чем при таких же начальных условиях в резце базовой конструкции (без охлаждения).

Таким образом, эффективность нового резца в целом была подтверждена. Вместе с тем оставалось неясным следующее:

- каковы должны быть размеры полости державки;
- какова должна быть толщина её медного покрытия;
- какова наиболее рациональная конструкция трубки, смонтированной в полости державки.

Цель статьи – исследовать влияние конструктивные особенности разработанного токарного резца на теплоотвод при тчении описанной конструкции и определению их оптимальных значений с целью достижения максимального теплоотвода из зоны резания.

Основная часть. Одним из главнейших факторов, определяющих процесс резания, является теплота, образующаяся в результате работы резания. Выделяющееся тепло определяет интенсивность износа инструмента, влияет на качество обработки поверхности и точность обработки деталей [7].

Теплота Q в процессе резания образуется в результате работы:

- 1) Внутреннего трения между частицами обрабатываемого металла в процессе деформации $Q_{\text{деф}}$;
- 2) Внешнего трения стружки о поверхность резца $Q_{\text{п}}$;
- 3) Внешнего трения поверхности резания и обработанной поверхности о заднюю поверхность резца $Q_{\text{з}}$;
- 4) Отрыва стружки, диспергирования (образования новых поверхностей) $Q_{\text{дисп.}}$.

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{дисп.}}$$

На сегодняшний день в современном машиностроении наблюдаются тенденции усложнения конструкций, увеличение номенклатуры, сокращение сроков производства и снижение себестоимость изделий. Как правило, реальная стойкость инструмента отличается от

той, которую заявляет производитель на 5% или даже на 60%, что приводит к простоям по постоянным заменам изношенного инструмента, а при отсутствии систем автоматизированного контроля к появлению брака.

Для уменьшения интенсивности износа режущего разрабатываются новые материалы инструмента, покрытий, технологии повышения стойкости инструмента, а также варианты новых технологий металлообработки.

Одним из вариантов повышения стойкости режущих инструментов – отвод тепла из зоны резания. Температура в зоне резания непосредственно зависит от скорости – чем выше скорость, тем больше температура. Стойкость инструмента имеет такую же зависимость от скорости резания.

Уравнение зависимости стойкости инструмента от температуры в зоне резания определяется:

$$T = \frac{C_p^{\frac{1}{m-2}} \cdot (C_{tp} \cdot v^x \cdot S^y)^{\frac{1}{m-2}}}{Q^{\frac{1}{m-2}}} \quad (1)$$

На основании получившейся формулы можно сделать вывод, что зависимость - график гипербола. Для уточнения параметров и значений графика, подставим коэффициенты. В данной работе исследуется резец с твердосплавной пластиной. Для данной пластины коэффициенты будут следующие: $x = 0,04$; $y = 0,4$; $z = 0,23$; $CV = 420$ [12]; $C_{tp} = 314$; $m = 0,2$ [13].

Также выставим режимы резания для чистовой обработки: глубина 0,3 мм; подача 0,07 мм/об; поскольку скорость является связывающей величиной, через которую получается формула (1), ее можно не указывать.

В табл.1 представлены результаты расчета контрольных точек графика.

Таблица 1 – Зависимость стойкости инструмента от температуры в зоне резания

Температура, °C	Стойкость, мин
600	264,6
700	56,6
800	14,9
900	4,6
1000	1,6
1100	0,6

На основании полученных значений строится график функции рис. 1 $T=f(Q)$.

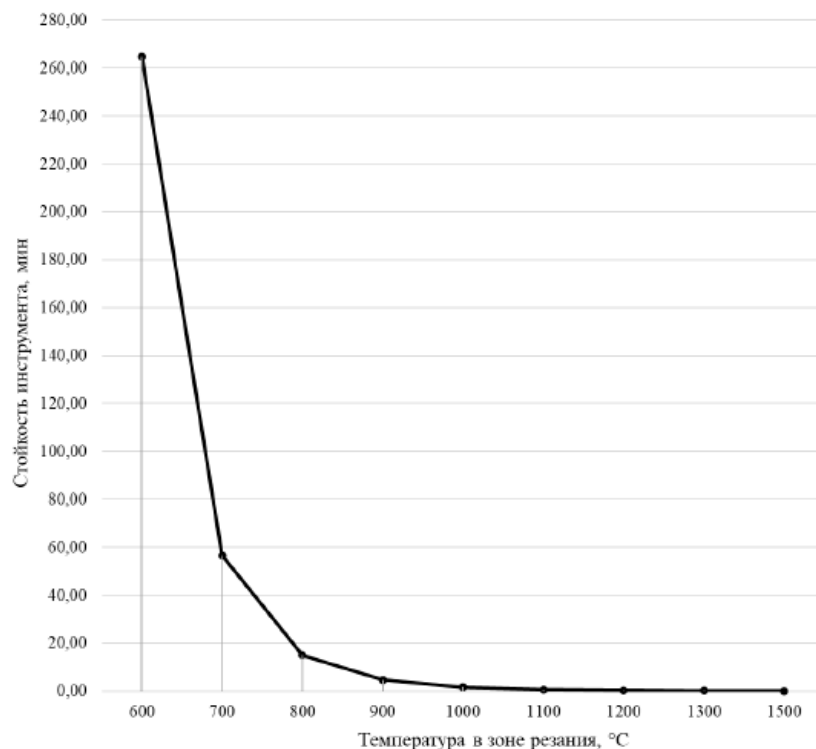


Рисунок 1. – График зависимости стойкости инструмента от температуры в зоне резания.

Модельные исследования предполагают создание модели посредством формализации описания изделия и выбора критерия адекватности модели. Исследование модели завершается интерпретацией результатов моделирования для определения предпочтительности того или иного проектного решения. С развитием компьютерных технологий компьютерные модели стали обычным инструментом математического моделирования и широко применяются в различных областях машиностроения. Компьютерные модели используются для получения новых знаний об объекте или для приближенной оценки поведения систем, слишком сложных для аналитического исследования. Достоинством компьютерных технологий является то, что они помогают убедиться в работоспособности изделия без привлечения больших затрат времени и средств. [14]

САЕ-системы включают расчетные модули, позволяющие оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Расчетные модули, используемые в САЕ-системах, как правило, основаны на численных методах решения дифференциальных уравнений (метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей и др.). [14]

Наиболее распространенный расчетный метод, используемый в САЕ-системах, — это метод конечных элементов (finite element method). Это численный метод решения математических уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. [15]

При выполнении в САЕ-системах задач инженерных исследований, называемых анализами, для описания поведения объекта исследования в заданных условиях создается расчетная модель, которая включает

геометрическую 3D-модель детали или сборки и набор условий, ограничивающих нагрузки и перемещения исследуемого изделия.

Решение поставленной задачи построено на моделировании и анализе процесса теплопередачи при резании в системе SolidWorks Simulation.

SOLIDWORKS Simulation — это полнофункциональный инструмент для инженерных расчетов и анализа изделий, полностью интегрированный в рабочую среду SOLIDWORKS, основным анализа которого является метод конечных элементов.

Последовательность подготовки и проведения анализа была такова.

1. Создание модели конструкции резца, подлежащей исследованию.
2. Определение перечня и пределов изменения конструктивных параметров резца в процессе исследования, величины прилагаемой термической нагрузки, начальных и граничных условий исследования.
3. Планирование компьютерного эксперимента и выбор практически реализуемых сочетаний конструктивных параметров резца, подлежащих исследованию.
4. Выполнение анализа теплопередачи в модели резца или выбранных сочетаниях параметров и его визуализация с помощью графиков зависимости распространения тепловой энергии от времени.
5. Определение конструктивных параметров резца, обеспечивающих наилучшую зависимость распространения тепловой энергии от времени (наилучшей теплоотдачи от вершины резца).
6. Разработка мероприятий по дальнейшей модернизации конструкции резца на основе найденной в п.5 наилучшей зависимости и их анализ, подобный указанному в п. 4.
7. Выбор и оценка наиболее целесообразного варианта модернизации.

На рис. 2. представлен эскиз резца с обозначением варьируемых конструктивных параметров (габаритные размеры державки были приняты 38x38x170 как наиболее распространенные). В табл. 2 приведены принятые диапазоны варьирования параметров.

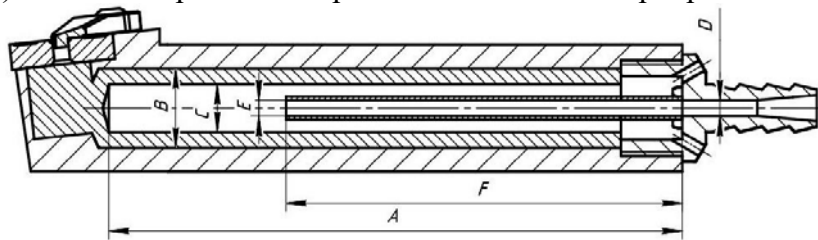


Рисунок 2. – Эскиз исследуемого резца:

A - глубина полости державки; B - диаметр полости (наружный диаметр покрытия;
C - внутренний диаметр покрытия; D - диаметр отверстия трубки в плоскости ее
присоединения к штуцеру; E - диаметр отверстия на конце трубки; F - длина трубки.

Таблица 2.

Варьируемый параметр		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Значение, мм	Мин.	85	20	10	5	2	85
	Макс.	127	28	18	8	5	125

Тепловая нагрузка W , приложенная к режущей кромке, и давление подводимого сжатого воздуха были приняты такие же, как в работе [6]: соответственно 17 W и 0,6 Мпа.

Необходимость в методике рационального планирования экспериментов возникает, когда приходится иметь дело с большим числом влияющих факторов, так как проверить на

опыте все возможные сочетания этих факторов практически невозможно из-за громадного числа таких сочетаний.

Задачей всякого экспериментального исследования является установление объективных закономерностей, которые выражаются зависимостями различных факторов друг от друга для последующего использования полученных зависимостей в управлении исследуемыми процессами [16].

Эксперимент проводился согласно плана в SOLIDWORKS.

SOLIDWORKS (солидворкс, от англ. solid — твёрдое тело и англ. works — работать) — программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. [18]

В качестве базовой конструкции был сконструирован сборный проходной резец с поперечным сечением державки 38x38мм, выполненной из стали 40X, углами $\gamma = -6^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 6^\circ$, $\epsilon = 90^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha_1 = 6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$. Твердосплавная пластина - SNMG 190616, способ крепления пластины к державке - прижим сверху рычагом за отверстие (рис. 3).

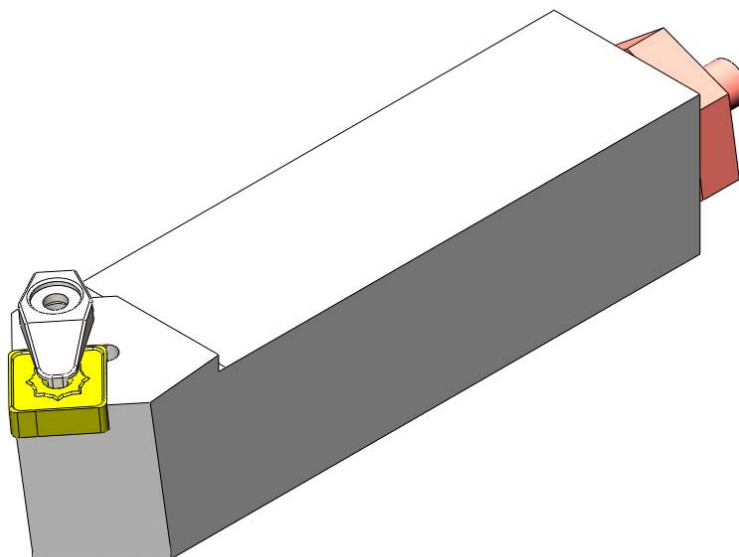


Рисунок 3. – 3D модель резца.

На первом этапе исследования проводился анализ и расчеты потоков поступающего в полость резца воздуха. Исследование проводилось в модуле Flow Simulation.

SOLIDWORKS Flow Simulation — вычислительный инструмент для моделирования потоковых процессов в текучей среде (CFD-анализ), полностью встроенный в SOLIDWORKS. CFD является полной заменой дорогостоящих испытаний в аэродинамической трубе или полевых условиях, позволяющий вычислять такие характеристики как: температура, скорость потока, давление и др.

Расчет для каждого эксперимента проходил по следующему алгоритму:

1. Согласно введенным значениям во вкладке «Уравнения» модель перестраивалась — получался очередной экземпляр для исследования.

2. Создавался «проект» исследования, в котором устанавливались параметры среды: рис. 4, рис. 5, рис. 6.

2.1. Поскольку нас интересуют температурные показатели рабочего элемента в разделе назначения проекта (рис. 4) определяем тип задачи как «Теплопроводность в твердых телах»; анализироваться будут потоки внутри резца.

Тип задачи		Учитывать замкнутые полости	
☒ Внутренняя ☐ Внешняя		☒ Исключить полости без условий течения ☐ Исключить внутреннее пространство	
Физические модели		Значение	
Теплопроводность в твердых телах		☒	
Радиационный теплообмен		☐	
Нестационарность		☐	
Гравитация		☐	
Вращение		☐	

Рисунок 4 – Выбор параметров назначения проекта.

2.2. Далее производится настройка среды (внутренней) рис .5, то есть выбор газа (жидкости, пара и т. д.), который будет использоваться в эксперименте – в данном случае это воздух из раздела «Газ».

Текучая среда	Единицы	Новый...
+ Газы		
+ Жидкости		
+ Неньютоновские жидкости		
+ Сжимаемые жидкости		
+ Реальные газы		
+ Пар		
		Добавить
Текучие среды проекта	Выбранные по умолчанию	Удалить
Air (Газы)	☒	Заменить

Рисунок 5. – Выбор параметров внутренней среды.

2.3. На третьем этапе задаются материалы, но, поскольку они уже были выбраны при построении моделей деталей, то просто импортируются в расчет.

2.4. На четвертом этапе определяются термодинамические параметры окружающей среды рис. 6.

Параметр	Значение
Задание параметров	Заданы пользователем
Термодинамические параметры	
Параметры	Давление, температура
Давление	101325 Pa
Температура	18.05 °C

Рисунок 6. – Выбор параметров внешней среды.

3. После того, как все параметры настроены, определяется рабочая область или же область расчета, для которой будут проводиться расчеты потоков. Размеры этой области будут соответствовать максимальным габаритным размерам сборочной единицы.

4. Устанавливаем цель расчета – определение температуры твердого тела.

5. Поскольку начальные параметры, условия внутренней и внешней среды, а также габаритные размеры сборочной единицы от опыта к опыту будут неизменными, п.2, п.3 и п.4 достаточно настроить один раз и просто переносить в каждый новый эксперимент.

6. Далее необходимо «закупорить» область расчета инструментом «заглушка». С его помощью перекрываем входное отверстие трубки и 6 отверстий на штуцере.

7. Обозначаем входное отверстие (трубка) – установив давление подачи воздуха на входе согласно условиям эксперимента и выходные отверстия (на штуцере).

8. После того, как все условия заданы, обозначены точки входа и выхода потоков воздуха, запускаем расчет.

9. По результатам расчета можно вывести интересующие параметры, в данном случае: распределение температуры потока рис. 7; распределение скоростей потока рис. 8; температурный градиент сборочной единицы рис. 9.

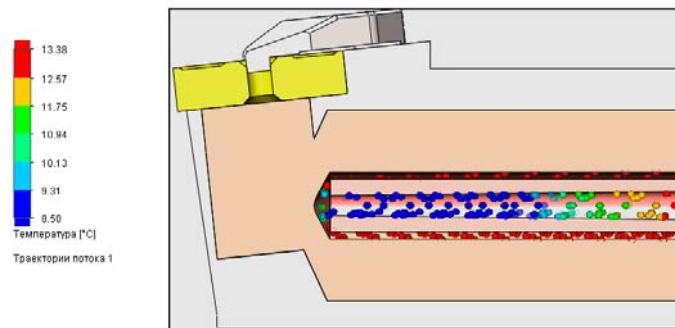


Рисунок 7. – Распределение температуры потока.

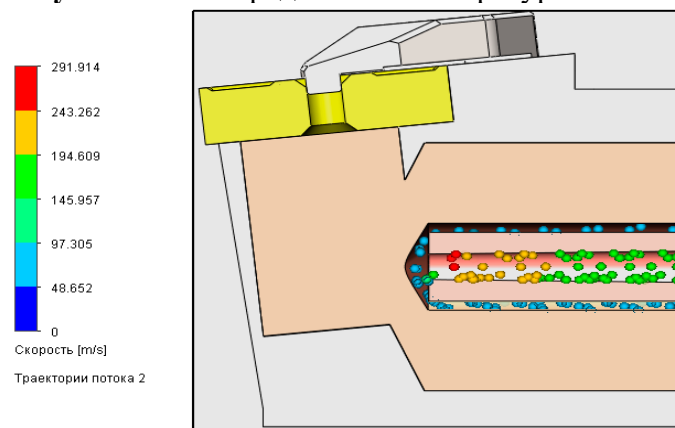


Рисунок 8. – Распределение скоростей потока.



Рисунок 9. – Температура твердого тела в сечении.

Примечание – серым цветом вокруг резца выделена рабочая область – она же область для расчетов.

Стоит отметить, что в данном модуле не прикладывается никаких дополнительных нагрузок, потоки воздуха показаны в условиях только окружающей среды. Результаты

полученные на данном этапе экспортируются в следующий модуль компонентов SOLIDWORKS - SOLIDWORKS Simulation.

Данные, полученные на первом этапе исследования, а именно распределение температуры твердого тела с учетом воздействия теплового

потока, экспортируются во второй модуль, где уже будут учитываться тепловые нагрузки, имитирующие условия резания.

Алгоритм проведения термического исследования следующий:

1. Экспортируются параметры конвекции газа из SOLIDWORKS Flow Simulation, полученные на этапе 2.3.1.

2. Задаются параметры исследования:

2.1. Задается общее время исследования – 900 сек, как и в статье [6], с временным инкремент 10 сек (время фиксации результата каждые 10 сек).

2.2. Далее для проведения анализа были определены области действия сил, возникающих в процессе резания и вызывающих тепловую нагрузку на резец. К этим областям прикладывалась тепловая нагрузка в виде теплового потока мощностью 17 W (рис.10) в течение заданного диапазона времени. Коэффициент конвективной теплоотдачи 25 W/м² K, начальная температура резца 20° C.

2.3. Материал каждой из деталей переносится в систему автоматически, так как был задан на этапе проектирования

2.4. Строится сетка модели, представляющая собой объемный тетраэдральный элемент с параболическим полем перемещений.

2.5. Далее происходит расчет согласно методу конечных элементов, а именно для каждого узла – точки пересечения граней тетраэдров, задается ряд параметров температурного анализа. Программное обеспечение CAE-системы для каждого конечного элемента генерирует аппроксимирующую функцию, связывающую поля интересующей величины (температуры.) с задаваемыми свойствами материала изделия, ограничениями и нагрузками. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. [14]

2.6. На край рабочего элемента устанавливается датчик (рис. 11) температуры, задача которого – фиксировать температурные измерения с интервалом в 10 сек.

2.7. На основании показаний датчика строится график зависимости температуры в течение 900 сек с учетом всех приложенных нагрузок.

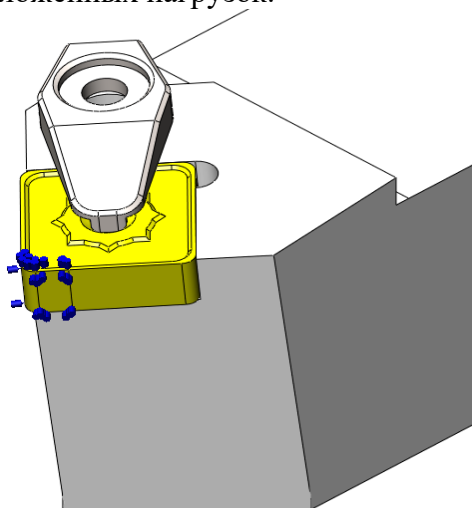


Рисунок 10. – Область действия тепловой нагрузки.

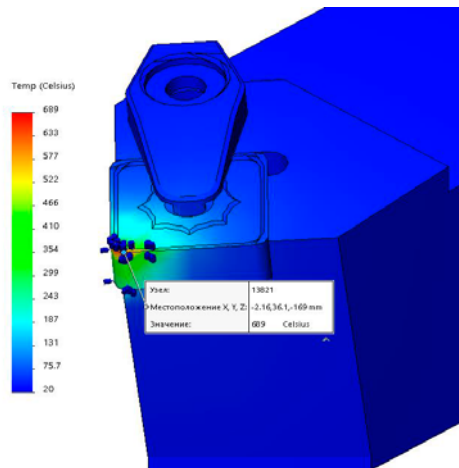


Рисунок 11. – Место установки датчика.

Название исследования: Термическая 1(По умолчанию)
Тип эпюры: Термическая Термический1

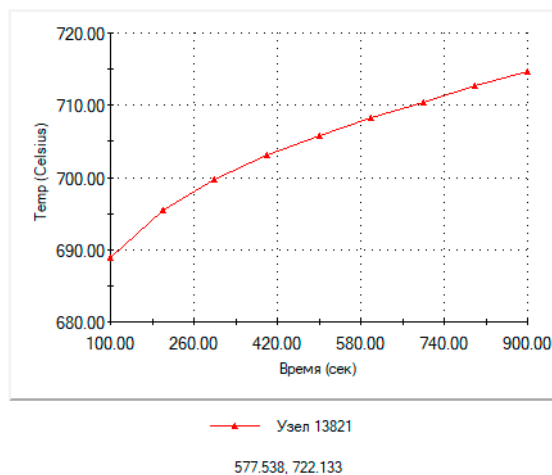


Рисунок 12. – График отклика для 1 опыта.

После проведения всех экспериментов (среди выделенных 25 реально могут существовать только 14) получился следующий график (рис. 13).

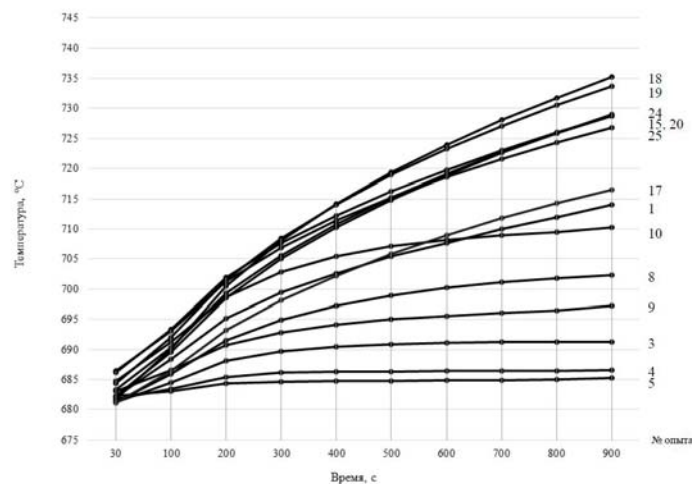


Рисунок 13. – Результаты эксперимента.

Лучшим среди по качеству охлаждения среди всех полученных результатов получился эксперимент под номером 5. Ему соответствуют следующие параметры: глубина полости державки – 125 мм; наружный диаметр покрытия – 28 мм; внутренний диаметр покрытия – 10 мм; больший диаметр отверстия трубки – 8 мм; малый диаметр трубки – 5 мм; длина трубки – 125 мм. При таких конструктивных параметрах резца температура вершины резца за 900 секунд снижается до 686°C (на 35 градусов ниже, чем у резца, описанного в работе [6]).

Первое, что следует отметить, что изменилось внутреннее сечение трубки: в резце прототипе она была с внутренним цилиндрическим отверстием, а в данном результате получилось коническое сечение с отношением диаметров почти в два раза. Такое явление объясняется изобарным сжатием, то есть процесс проходит при неизменном давлении, тогда, согласно закону Гей-Люссака, при изобарном процессе отношение объема к температуре постоянно:

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Таким образом, выражая зависимость изменения температуры от изменения объема, получается:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

На основании этой зависимости становится понятно, что при уменьшении занимаемого объема температура будет уменьшаться. Также следует отметить, что при уменьшении диаметра сечения увеличивается скорость потока, тем самым ускоряя процесс переноса теплых масс от зоны прогрева.

Как и в случае с прототипом, так и в этих экспериментах, результаты говорят о том, что чем больше медной «массы» тем лучше происходит теплоотвод, так, например, все опыты, где толщина медной вставки значительно меньше, находятся гораздо выше, чем те, где она больше.

Также следует отметить, длину отверстия, которое почти подведено под фундамент режущего элемента, а длина трубки получилась такой, что разогнанный холодный поток воздуха доставляется непосредственно в зону интенсивного прогрева.

Заключение. В работе экспериментальным путем было подтверждено, что внутреннее охлаждение сжатым воздухом действительно является эффективным и перспективным средством охлаждения токарного инструмента и во многих случаях может успешно использоваться вместо традиционного охлаждения СОТС.

В процессе исследований влияния конструктивных параметров резца на увеличение теплоотвода определено, что выполнение отверстия трубки резца коническим позволяет улучшить теплоотвод, следствием чего является снижение температуры. Ему соответствуют следующие параметры: глубина полости державки – 125 мм; наружный диаметр покрытия – 28 мм; внутренний диаметр покрытия – 10 мм; больший диаметр отверстия трубки – 8 мм; малый диаметр трубки – 5 мм; длина трубки – 125 мм. При таких конструктивных параметрах резца температура вершины резца за 900 секунд снижается до 686°C.

Далее было установлено, что при изменении конусности, можно незначительно снизить температуру: из полученных результатов следует, что уточненное решение при следующих размерах - большом (заходном) диаметре трубки равном 7 мм, а малом равном 3,5 мм. Конечная температура такого варианта соответствует значению 683°C.

Список литературы

1. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах: / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Москва: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Хамидуллова, Л.Р. Классификация и комплексная оценка смазочно-охлаждающих жидкостей по степени воздействия на человека и биосферу /Л.Р. Хамидуллова, А.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13. - № 5. - С. 279-281.
3. Курносов, Н. Е. Обеспечение охлаждения режущего инструмента при лезвийной обработке в машиностроении системой подачи в зону резания охлажденного ионизированного воздуха / Н. Е. Курносов, К. В. Лебединский, А. С. Асосков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – №4 (44). – С. 68-80. DOI 10.21685/2072-3059-2017-4-7.
4. Вылегжанин Д.Г. Использование систем воздушного охлаждения при обработке металлов резанием // Шестая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. Москва, 25-28 сентября 2013 г. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013 .С. 45– 46.
5. Пат 204216 U1 Рос. Федерация, МПК В23В 27/10 (2006.01) Металлообрабатывающий инструмент с охлаждением.
6. Либерман Я. Л. Исследование влияния конструкции токарного резца на отвод тепловой энергии из зоны резания / Я. Л. Либерман, С. В. Лукинских, А. В. Смирнов // Промышленное производство и металлургия: мат-лы международной науч.- техн. конф. (18–19 июня 2020 г), - УрФУ, 2020. – С. 49-55.
7. Ничкова С.А., Ничков А.В. ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ: Методические указания. - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 16 с.
8. Резников А.Н. Современные задачи теплофизических исследований в области резания лезвийными инструментами и шлифования. // Теплофизика технологических процессов. - 1974: Саратовск, С. 3-14.
9. В.А. Кривоухов, Б.Е. Бруштейн, С.В. Егоров, А.Г. Червяков, Н.А. Челобов, М.А. Мякишев, В.Г. Бовин, П.г. Петруха, П.Д. Беспехотных Обработка металлов резанием. - Москва: Государственное издание оборонной промышленности, 1958. - 627 с.
10. Ящерицын П.И., Фельдштейн Г.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Учебник для студентов вузов. Минск: Новое знание, 2007. – 512 с.
11. Орнис Н.М. Основы механической обработки металлов. - Ленинград: Ленинградская типография №6 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, 1968. - 230 с.
12. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т.2/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.-4-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985, 496 с.
13. Розенберг Ю.А. Резание материалов: учебник для техн. вузов – Курган: Изд-во «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007 – 294 с.
14. Лукинских С.В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учебное пособие; М-во науки и высш. обр. РФ. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 168 с.
15. Черепашков А.А. Носов Н.В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. — Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. — 640 с: илл.
16. Протодяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов. М., изд. Ин-та горного дела им. А.А. Скочинского, 1962.

17. Протоdjяконов М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протоdjяконов, Р. И. Тедер. – М.: Наука. 1970, – 76 с.
18. SolidWorks // Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 04.11.2021).

УДК 621.7

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ

*А.А. Буданов¹,
А.Г. Карлов¹*

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

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается разработка и внедрение автоматизированного комплекса для лазерной резки металлических труб, акцентируя внимание на процессе оптимизации движения инструмента. Основная мысль статьи заключается в том, что правильная организация рабочего процесса, включая последовательность и скорость перемещения резака, значительно повышает эффективность и качество резки, а также снижает затраты на обработку.

Ключевые слова: лазерная резка, моделирование, оптимизация, автоматизированные системы, траектория движения.

OPTIMIZATION OF THE TOOL MOVEMENT OF THE AUTOMATED COMPLEX OF LASER CUTTING OF METAL PIPES

*A.A. Budanov¹,
A.G. Karlov¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

This article discusses the development and implementation of an automated complex for laser cutting of metal pipes, focusing on the process of optimizing tool movement. The main idea of the article is that the correct organization of the workflow, including the sequence and speed of movement of the cutter, significantly increases the efficiency and quality of cutting, as well as reduces processing costs.

Keywords: laser cutting, modeling, optimization, automated systems, motion trajectory.

Введение. Автоматизированный комплекс лазерной резки металлических труб представляет собой высокотехнологичное решение, созданное для обеспечения максимальной эффективности и точности в обработке металлов. В его основе лежат современные лазерные технологии, позволяющие выполнять резку с минимальными расчетными потерями и высоким качеством сечений.

Оптимизация движения инструмента — ключевой аспект данного комплекса, позволяющий снизить время обработки и увеличить производительность. Интеллектуальные

алгоритмы обеспечивают безупречную координацию действий механических компонентов, что приводит к уменьшению времени простоя и повышению общей продуктивности.

Система управления комплексом оснащена интуитивно понятным интерфейсом, который позволяет операторам легко настраивать параметры резки в соответствии с конкретными требованиями клиента. Дополнив это многофункциональными сенсорными системами, обеспечивается непрерывный контроль за качеством выполняемых операций и его мгновенная корректировка при необходимости.

В современном приборостроении активно используют технологическое оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ), включая трехмерные принтеры, сканеры и роботизированные системы.

Основной задачей проектирования алгоритмов для контроллеров с ЧПУ является минимизация времени обработки с учетом возможностей аппаратного и программного обеспечения и механических характеристик электроприводов. Производительность оборудования зависит от правильного выбора траектории и скорости движения исполнительного механизма, представленными в виде последовательности узловых точек и сегментов.

Для оптимизации необходимо достичь максимальной контурной скорости. Однако стандарт (ГОСТ 20999-83) не обязывает установки с ЧПУ разгоняться до заданной скорости, что приводит к проблемам, когда двигатели не могут достичь необходимой контурной скорости из-за кривой разгона-торможения.

На коротких сегментах траектории кривой разгона, как правило, имеет треугольную форму, вызывая резкие движения, вибрации и износ компонентов устройства.

Цель исследования:

Усовершенствовать автоматизированную систему лазерной резки металлических труб путем разработки и внедрения алгоритма оптимизации траектории движения инструмента, что позволит:

- Повысить эффективность использования материала путем минимизации отходов и увеличения выхода годных изделий.
- Улучшить производительность за счет сокращения времени обработки и повышения скорости реза.
- Повысить качество реза за счет обеспечения гладких и точных кромок, минимизации заусенцев и деформаций.

Оптимизированная траектория движения инструмента обеспечит более гладкие и точные кромки реза. Это связано с тем, что оптимизированная траектория учитывает как геометрические особенности трубы, так и характеристики лазерного резака. Это приводит к уменьшению заусенцев, деформаций и других дефектов, что улучшает общее качество готовых изделий.

Внедрение алгоритма оптимизации траектории движения инструмента позволит автоматизированной системе лазерной резки труб работать более эффективно, производительно и качественно. Это принесет пользу как производителям, так и потребителям, обеспечивая экономию средств, повышение производительности и улучшение качества продукции.

Моделирование траектории обработки и соединения труб различных диаметров

R, r – радиусы труб ($R > r$)

R – радиус основной трубы, r – радиус врезаемой трубы.

Ось основной трубы совпадает с осью OX, врезаемой трубы - с осью OZ. Тогда уравнения этих цилиндров имеют вид:

$$C(R, \varphi, x) = \left(\frac{x}{\frac{R * \cos(\varphi)}{R * \sin(\varphi)}} \right) \quad (1)$$

$$C(r, t, z) = \left(\frac{\frac{r * \cos(t)}{r * \sin(t)}}{z} \right) \quad (2)$$

где, R, r – радиусы труб ($R > r$); R – радиус основной трубы, r – радиус врезаемой трубы.

Координаты этих точек цилиндров на линии пересечения совпадают. Отсюда получим уравнение (3) линии пересечения (**R**, **r** – заданы, параметр **t** пробегает отрезок $[0, 2\pi]$):

$$Cc(R, r, t) = \left(\begin{array}{c} r * \cos(t) \\ r * \sin(t) \\ R * \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 * \sin(t)^2} \end{array} \right) \quad (3)$$

Вторая линия симметрична первой относительно плоскости $Z=0$, т.е. третья координата отличается знаком.

Длина кривой вычисляется по формуле (4):

$$L(R, r) = \int_0^{2\pi} \left| \frac{d}{dt} Cc(R, r, t) \right| dt \quad (4)$$

Интеграл имеет вид (5):

$$L(R, r) = r * \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + \frac{r^2 * \sin(2t)^2}{4 * (R^2 - r^2 * \sin(t)^2)}} dt \rightarrow \quad (5)$$

Основная труба: $C1(t, x) \leftarrow C(R, t, x)$

Вторая труба:

$$C2(t,s) := \begin{bmatrix} r \cdot \cos(t) \\ r \cdot \sin(t) \\ R \cdot \left[1.5 \cdot (1 - s) + s \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \cdot \sin(t)^2} \right] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Отверстие:

$$C3(y,s) := \begin{bmatrix} (2s - 1) \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \\ y \\ \sqrt{R^2 - y^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Сварной шов: $C_4(t) := Cc(R,r,t)$

Длина траектории для R=50,65 мм; r=50,65 мм

$$L := r \cdot \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + \frac{r^2 \cdot \sin(2t)^2}{4 \cdot (R^2 - r^2 \cdot \sin(t)^2)}} dt = 370.17$$

	0	1	2			
	0	50.65	0	50.65	11	-44.55
	1	47.91	16.45	47.91	12	-34.3
	2	39.97	31.11	39.97	13	-20.35
	3	27.7	42.4	27.7	14	-4.18
	4	12.43	49.1	12.43	15	12.43
	5	-4.18	50.48	4.18	16	27.7
	6	-20.35	46.38	20.35	17	39.97
	7	-34.3	37.26	34.3	18	47.91
	8	-44.55	24.11	44.55	19	50.65
TXYZ =	9	-49.96	8.34	49.96		-1.24*10 ⁻¹⁴
	10	-49.96	-8.34	49.96		50.65

Рисунок 1. - Координаты точек для R=50,65 мм; r=50,65 мм

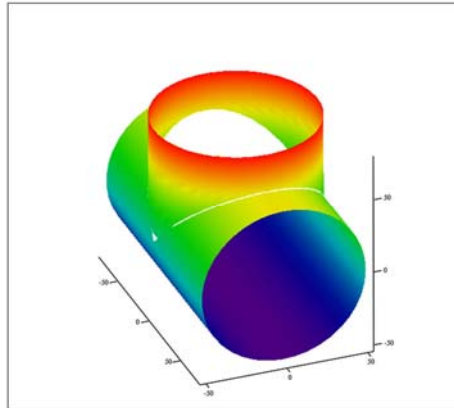


Рисунок 2. - Соединение труб R=50,65 мм; r=50,65 мм.

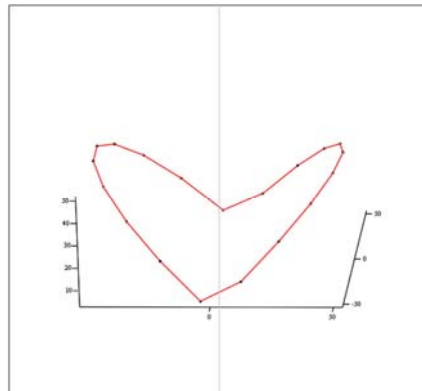


Рисунок 3. - Траектория для соединения труб R=50,65 мм; r=50,65 мм.

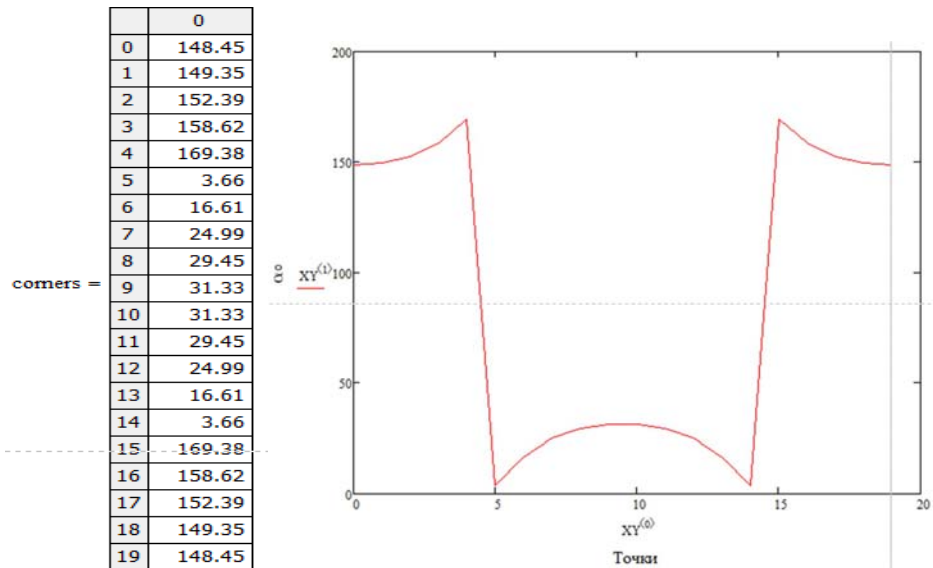
Расчет углов режущего инструмента в каждой из точек траектории обработки

TXYZ :=	50.65	0	82.5
	47.91	0	80.84
	39.97	0	76.41
	27.7	0	70.77
	12.43	0	66.3
	-4.18	0	65.26
	-20.35	0	68.23
	-34.3	0	73.6
	-44.55	0	78.9
	-49.96	0	82.08
	-49.96	0	82.08
	-44.55	0	78.9
	-34.3	0	73.6
	-20.35	0	68.23
	-4.18	0	65.26

Рисунок 4. - Координаты точек траектории для R=50,65 мм; r=50,65 мм

Расчет углов для каждой точки:

```
comers := for i ∈ 0..rows(TXYZ)
  k ← atan( (TXYZ<2>) / (TXYZ<0>) ) * 180 / π + 90
  k
```



Рисунки 5,6 - Таблица значений и график углов

Анализ и сравнение траекторий обработки с различным количеством точек

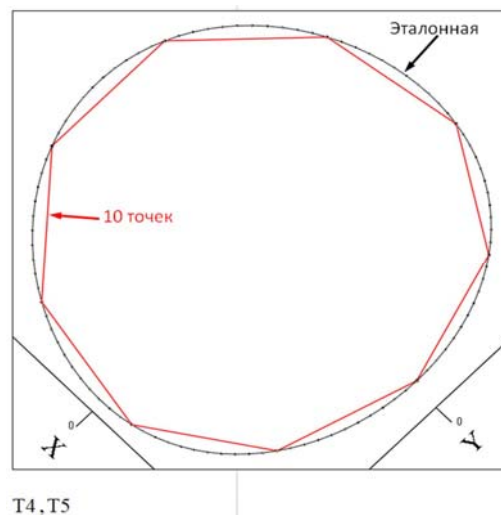


Рисунок 7. - траекторий из 10 точек и Эталонная траектория

Расчет погрешности, при обработке по траектории, состоящей из 10 точек, при требуемой точности 10 мм (методом наименьших квадратов (8)):

$$x_1:=78.38 \quad x_2:=76.59 \quad z_1:=25.74 \quad z_2:=30.66$$

$$a := \frac{[2 * [(x_1 * z_1) + (x_2 * z_2)] - (x_1 + x_2) * (z_1 + z_2)]}{2 * (x_1^2 + x_2^2) - (x_1 + x_2)^2} \quad (8)$$

$$a = -2.75$$

$$b := \frac{[(z1 + z2) - a * (x1 + x2)]}{2} \quad (9) \quad h := \frac{x1 + x2}{2} \quad h = 81.43$$

$$\begin{aligned} b &= 241.18 \\ f_1 &:= a * 77.48 + b \\ f_1 &= 28.21 \end{aligned}$$

$$a := \frac{[2 * [(xx1 * zz1) + (xx2 * zz2)] - (xx1 + xx2) * (zz1 + zz2)]}{2 * (xx1^2 + xx2^2) - (xx1 + xx2)^2}$$

$$a = -2.75$$

$$b := \frac{[(z1 + z2) - a * (x1 + x2)]}{2}$$

$$b = 226.68$$

$$\begin{aligned} f_1 &:= a * 77.48 + b \\ f_1 &= 13.79 \end{aligned}$$

Итоговая погрешность:

$$\begin{aligned} ff &:= f_1 - f_2 \\ ff &:= 14.42 \text{ мм} \end{aligned}$$

Сравнение траекторий – 20 точек и Эталонной траектории:

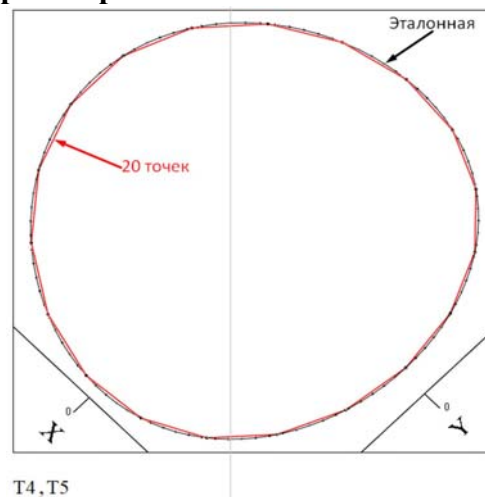


Рисунок 8. - траектории из 20 точек и эталонная траектория

Расчет погрешности, при обработке по траектории, состоящей из 20 точек, при требуемой точности 10 мм (методом наименьших квадратов (10)):

$$x_1:=81.84 \quad x_2:=81.01 \quad z_1:=10.44 \quad z_2:=15.61$$

$$a := \frac{[2 * [(x_1 * z_1) + (x_2 * z_2)] - (x_1 + x_2) * (z_1 + z_2)]}{2 * (x_1^2 + x_2^2) - (x_1 + x_2)^2} \quad (10)$$

$$a = -2.75$$

$$b := \frac{[(z_1 + z_2) - a * (x_1 + x_2)]}{2} \quad (11) \quad h := \frac{x_1 + x_2}{2} \quad h = 81.43$$

$$b = 520.21$$

$$f_1 := a * 77.48 + b$$

$$f_1 = 37.6$$

$$xx_1:= 82.5 \quad xx_2:= 78.03 \quad zz_1:= 0 \quad zz_2:= 26.79$$

$$a := \frac{[2 * [(xx_1 * zz_1) + (xx_2 * zz_2)] - (xx_1 + xx_2) * (zz_1 + zz_2)]}{2 * (xx_1^2 + xx_2^2) - (xx_1 + xx_2)^2}$$

$$a = -5.99$$

$$b := \frac{[(z_1 + z_2) - a * (x_1 + x_2)]}{2}$$

$$b = 494.45$$

$$f_1 := a * 77.48 + b$$

$$f_1 = 30.09$$

Итоговая погрешность:

$$ff := f_1 - f_2$$

$$ff := 7.51 \text{ мм}$$

Вывод: Исследование траектории движения инструмента при автоматизированной лазерной обработке для различных сортов труб показало следующие результаты:

- выявлен один из способов оптимизация движения инструмента по требуемой траектории с целью повышения производительности обработки, без снижения точности воспроизведения траектории, который заключается в установке необходимого минимального количества точек траектории обработки;

- это позволяет уменьшить износ исполнительного механизма, отвечающего за движения режущего инструмента, и повысить производительность комплекса.

Список литературы

1. Обработка металлов резанием: Справочник технолога/ А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общей ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение. 1988. 736с.
2. Акимов С. В., Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В. Оптимизация траектории движения исполнительного устройства оборудования с ЧПУ при лазерной обработке поверхности объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60
3. Обзор методов контроля качества сварных соединений / А.А. Таланин, А.М. Мазанов, Л.А. Закалюкина, М.С. Шамионов, В.Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. – Т. 2. – С. 186-188.
4. Лазерные технологии в производстве / Л.А.Закалюкина// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. – Т. 3. – №8-2 (19-2). С.169-172.
5. А.Г. Григорьянц Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение. 1989г. 304с.
6. Технологии и применение лазерной обработки в современном производстве / Л.А. Закалюкина, С.В.Погодаев, В.Я. Баннов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2016.

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.763

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ВТОРИЧНОГО ПЭТ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Т.А. Паничкин¹,
Н.В. Сабиров²
Ю.О. Шагова¹*

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

²ФГБУН «Российская академия ракетных и артиллерийских наук, г. Москва, Россия.

АННОТАЦИЯ

В процессе вторичной переработки - ПЭТ теряет свои механические характеристики, что значительно ограничивает область применения изделий из вторсырья. С целью повышения механических свойств материала - предлагается использовать, в качестве модификатора, наночастицы карбида вольфрама WC. В статье проведены исследования по влиянию наночастиц карбида вольфрама на относительное удлинение и предел прочности модифицированных материалов на основе вторичного ПЭТ высокого давления.

Ключевые слова: вторичный ПЭТ; наночастицы карбида вольфрама, полиэтилентерефталат.

THE PROSPECTS FOR THE USE OF TUNGSTEN CARBIDE NANOPARTICLES FOR THE MODIFICATION OF SECONDARY HIGH-PRESSURE PET

T.A. Panichkin¹

N.V. Sabirov²

J.O. Shagova¹

1 Sevastopol State University, Sevastopol, Russia;

2 Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Moscow, Russia.

ABSTRACT

In the process of recycling, PET loses its mechanical characteristics, which significantly limits the scope of application of recyclable products. In order to improve the mechanical properties of the material, it is proposed to use WC tungsten carbide nanoparticles as a modifier. The article studies the effect of tungsten carbide nanoparticles on the elongation and tensile strength of modified materials based on secondary high-pressure PET.

Keywords: secondary PET; tungsten carbide nanoparticles, polyethylene terephthalate.

Введение. Анализ литературных данных [2-7] свидетельствует о том, что в мире уделяется пристальное внимание модификации вторичных термопластов, так как получение новых композитов, на основе термопластов, позволяет увеличить жизненный цикл изделий и расширить сферы их применения.

Для реализации этих задач возникает потребность повышения механических характеристик материала путём его модификации. Наиболее перспективной технологией модификации вторичного ПЭТ является использование наночастиц различных соединений [1-6].

Рассмотрены существующие технологии модификации вторичного ПЭТ: армирование ПЭТ углеродными и графеновыми нанотрубками [2,3]; модификация наночастицами AgCl под воздействием ультразвука в качестве бактерицидного средства [4]; модификация полимеров наноглиной [5]; модификация наночастицами Ca, TiO₂, Mg(OH)₂, SiO₂ при взаимодействии с терефталевой кислотой [6].

Все вышеприведённые технологии, в разной степени, способствуют повышению механических характеристик термопластов. Однако обладают одним общим недостатком - высокой добавочной стоимостью, которая превышает цену производства первичного ПЭТ. Данный факт делает эти технологии нерациональными в условиях рыночной экономики.

На сегодняшний день, стоит острая необходимость поиска и разработки бюджетной технологии повышения механических характеристик вторичного ПЭТ. Одним из возможных методов снижения себестоимости технологии, может быть применение наномодификаторов, полученных методом микробиологического выщелачивания из скрапа твердосплавного инструмента [1].

Ранее авторами были проведены исследования эффективности применения наночастиц карбида вольфрама (WC) в качестве модификатора вторичного ПЭТ [1]. Опытным путем установлено, что наночастицы карбида вольфрама, способны оказывать положительное влияние на механические свойства термопласта, а именно, на относительное удлинение.

В данной работе рассматривается возможность применения модификатора в более широком диапазоне концентраций, с целью расширения имеющейся информационной базы, о характере влияния наночастиц карбида вольфрама WC на механические характеристики вторичного ПЭТ (полиэтилен высокого давления).

Ниже приведены результаты уточняющих исследований по определению влияния наночастиц карбида вольфрама WC на механические свойства вторичного ПЭТ (полиэтилен высокого давления), в зависимости от концентрации наномодификатора к основе.

Образцы для испытаний изготавливались согласно, ГОСТ 12015 – Пластмассы, изготовление образцов для испытания из реактопластов. Общие требования.

Непосредственно испытания проводились по:

- ГОСТ 11262 — 2017 - Метод испытания на растяжение.

- ГОСТ 34370 – 2017 Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении.

Для изготовления испытуемого образца, за основу был выбран вторичный полиэтилен высокого давления ПВД, таблица 1.

Таблица 1. Характеристики гранул вторичного ПЭТ

Показатель	Характеристика
Внешний вид	Цилиндр с отверстием
Размеры (длина, диаметр гранулы, диаметр отверстия)	3мм x 3мм 1мм
Температура плавления °С (ПВД,ПНД)	230 / 220
Содержание бумаги и др. не полимерных примесей	0,15%
Содержание полимерной этикетки	0,05%
Насыпная плотность, г/л	260-280

Порошок карбида вольфрама WC представляет собой нанопластины с размером до 100 нм, химический состав порошка - 98.95% вольфрама, 1.05% углерода.

Для изготовления образцов гранулы ПЭТ подвергаются сушке в термо-шкафу при 120 °С в течение 4-х часов, дабы избежать образования дефектов в испытуемых изделиях. Затем гранулы смешиваются с модификатором. Все компоненты: ПЭТ, модификатор, наполнители - взвешиваются на электронных весах, с точностью 0,01 г. После чего к гранулам добавляется нанопорошок карбида вольфрама WC, смесь помещается в герметичную колбу универсального лабораторного смесителя Вибротехник С2.0, где происходит смешивание компонентов в течении 2-х часов, с частотой 20 Герц.

После, полученную однородную смесь, загружали в приемное устройство экструдера с элементами косвенного нагрева, для производства образцов. Расплавив пластик, при температуре 220-240 °С, производится процесс экструзии смеси в матрицу под давлением. Затем матрица охлаждается и извлекается образец, удаляя лишний облой.

Испытания по определению разрушающей нагрузки при разрыве и длины растяжения образца, производилась на универсальной испытательной машине ТРМ-50. Программа машины фиксировала усилие на растяжение образца, при постоянной скорости растяжения. На рисунке 1-2 и таблице 2-3 представлены статистические данные результатов испытаний. Для каждой из выбранных концентраций было произведено испытание на 10 единицах стандартных образцов.

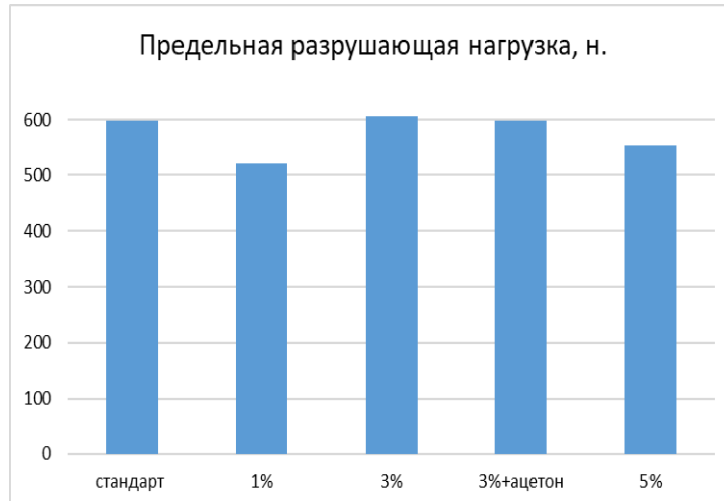


Рисунок 1. График влияния наночастиц карбида вольфрама WC , в зависимости от концентрации, на разрушающую нагрузку растяжения образцов из вторичного ПЭТ (полиэтилен высокого давления).

Таблица 2. Результаты испытаний.

Концентрация наномодификатора в % к массе основы	Среднее значение разрушающей нагрузки, Н.	Прирост характеристик относительно стандартных в %
0	599	-
1	522,3	-12,8
3	607,3	1,38
3%+ацетон	597,5	-0,25
5	555	-7,34

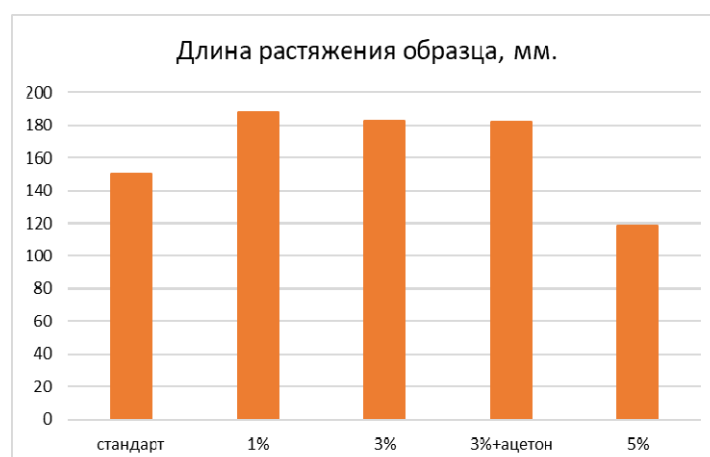


Рисунок 2. График влияния наночастиц карбида вольфрама WC , в зависимости от концентрации, на длину растяжения образцов вторичного ПЭТ (полиэтилен высокого давления).

Таблица 3. Результаты испытаний.

Концентрация наномодификатора в % к массе основы	Среднее значение длины растяжения образца, мм.	Прирост характеристик относительно стандартных в %
0	150	-
1	180	20
3	173	15,3
3%+ацетон	177	18
5	119	-20,6

Вывод. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что модификация вторичного ПЭТ наночастицами карбида вольфрама не ведет к существенному росту предела прочности на разрыв, максимальный прирост характеристики при концентрации в 3% составляет 1,38%, но в тоже время существенно увеличивает относительное удлинение образцов, максимальный прирост характеристики при концентрации в 1% составляет 20%, что в перспективе позволит использовать модифицированный материал для производства плёночных и изоляционных покрытий, пакетов, шлангов высокого давления, ёмкостей для воды. Дальнейшие исследования предполагаются для определения абразивного износа и трибологических свойств материала.

Список литературы

1. Паничкин Т. Перспективы использования вольфрам-содержащих соединений для модификации вторичного ПЭТ. [Текст]/ С.М. Братан, Н.В. Собиров, В.М. Гавриш // 74 международная студенческая научная конференция Московского Политеха.- Москва, 01–26 апреля 2024 года
2. Feng N. Modification of the surface of recycled carbon fiber and its effect on the reinforcement of nylon composites: Mechanical properties, morphology and crystallization features. [Text]/ X. Wang, D. Wu // Course of applied physics, - 2013. - No. 13. pp. 2038-2050.
3. Chow Reddy R. Composites from recycled polyethylene terephthalate and graphene nanotrombocytes with improved machinability and performance [Text]/ K. Nord-Warhaug, F. Rapp // J Mater Sci, 53 (2018), pp. 7017-7029, 10.1007/s10853-018-2014-0.
4. Grumezescu, A.M. Electro-spun polyethylene terephthalate nanofibers loaded with silver nanoparticles: a new approach in anti-infective therapy. [Text]/ A.E. Stoica, M.S. Dima-Balchescu, S.S.Chirkov // J. Clin. Med.- 2019- p. 1039.
5. Krakalik M. Recycled PET nanocomposites improved by organoglin silanization [Text]/ M. Studenovskiy, Ya. Myakisheva, A. Sikora, R. Tomann, K. Friedrich // Appendix Polym Sci, 106 (2007), pp. 926-937, 10.1002/appendix.26690.
6. Asaad N. Unsaturated polyester nanocomposites based on polyethylene terephthalate waste using various types of nanofillers [Text]/ S.L. Abd-el-Messie, N.E. Ikladius // Process in mechanical engineering - Part N J Nanoeng Nanosystem, 228 – 2014- pp. 174-183.
7. Федеральная служба государственной статистики: офиц. Сайт. Москва, 2005. ULR: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 15.10.2024.).

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 642.58:613.21

РАЗРАБОТКА ПЕЧЕНЬЯ ОВСЯНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**О.П. Чуб¹,
Д.О. Еременко¹**

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Разработана рецептура и технологический процесс мучного кондитерского изделия повышенной биологической ценности и пониженной калорийности относительно базового варианта печенья овсяного ГОСТ 24901-2014. Ингредиенты нового продукта: мука пшеничная, овсяная, льняная, яйца, сливочное масло, разрыхлитель, соль, сахар, натуральные специи (корица, имбирь, куркума). Использование натуральных специй улучшает органолептические характеристики, повышает количество антиоксидантов, биологически активных веществ, положительно влияет на увеличение срока годности нового продукта. Получен прирост содержания белка более 20%, содержание насыщенных жирных кислот снижено на 53,73%, повышено содержание витаминов В1, В2 соответственно на 46,15% и 50%, калорийность снижена на 15%. Значительно увеличилось содержание микро- и макроэлементов от 15% и более. Таким образом, получен новый функциональный продукт с улучшенными потребительскими свойствами.

Ключевые слова: печенье, функциональные добавки, антиоксиданты, повышение биологической ценности.

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL OATMEAL COOKIES

**O.P. Chub¹,
D.O. Eremenko¹**

1 Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The formulation and technological process of oatmeal cookies of increased biological value and reduced calorie (relative to the basic version of GOST 24901-2014) have been developed. Ingredients of the new product: wheat, oatmeal, flaxseed flour, eggs, butter, baking powder, salt, sugar, natural spices (cinnamon, ginger, turmeric). Spices improved organoleptic characteristics, increased the amount of antioxidants, biologically active substances and affected positively on increasing the shelf life of a new product. An increase in protein content of more than 20% was obtained, the content of saturated fatty acids was reduced by 53.73%, the content of B1 and B2 vitamins was increased by 46.15% and 50%, respectively, and the calorie content was reduced by 15%. The content of micro- and macronutrients has increased of 15% or more. As a result a new functional product has been obtained, it is characterized by improved consumer properties.

Keywords: cookies, functional additives, antioxidants, increase of biological value.

Введение. Приоритетным направлением развития пищевой отрасли в России согласно «Стратегии формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 г.» является производство продуктов питания функционального назначения. Мучные кондитерские изделия (МКИ) имеют большое значение в питании населения России. Ежедневное потребление наряду с хлебом делает их продуктами первостепенного значения. К мучным кондитерским изделиям относят и различные виды печенья, которое традиционно пользуется большим спросом. Его основные достоинства: достаточно большой срок хранения, удобство транспортировки и потребления, сравнительно простая технология приготовления.

Анализ ассортимента МКИ в России показал, что ограниченно представлены МКИ повышенной биологической ценности и функционального назначения. Существенным недостатком традиционных рецептур МКИ является высокая калорийность и низкое содержание пищевых волокон, антиоксидантов, витаминов, других биологически активных, полезных для здоровья веществ. Также мучные кондитерские изделия активно поддаются окислительным процессам, что значительно снижает их сроки хранения, ужесточает условия хранения. Поэтому корректировка рецептурного состава традиционной продукции с целью повышения пищевой и биологической ценности – актуальная задача.

Основная часть. В ходе исследования был проведен обзор использования основного и дополнительного сырья в инновационных технологических процессах производства печенья. Особое внимание уделялось возможности повышения пищевой и биологической ценности (содержание белка, витаминов, микроэлементов, пищевых волокон), снижению калорийности. Далее приводятся примеры основных подходов к проектированию рецептур печенья функционального назначения.

Ряд авторов предлагают использовать различные виды муки при составлении смеси с пшеничной или без нее, когда возможно спроектировать в том числе и безглютеновые продукты. Глютен содержится кроме пшеницы и в других злаках, таких как, ячмень, овес и тритикале. Очевидно, использование продуктов, изготовленных из данных зерновых культур, исключается в составе специализированных продуктов питания при непереносимости глютена. Развивается также и направление разработки технологий элиминации (разрушения белка в злаках) для безглютеновых изделий с использованием экструдирования при высокой температуре и давлении [1].

Известно, что для пшеничной муки [2] «чем тоньше помол и длительней обработка зерна, тем меньше остаётся в муке витаминов» и других важных для здоровья человека нутриентов. Потери составляют [2]: «витамина В1 – 86 %, витамина В2 – 70 %, витамина В3 – 80 %, витамина В6 – 60 %, фолиевой кислоты – 70 %, железа – 84 %, кальция – 50 %, фосфора – 78 %, меди – 75 %, магния – 72 %, марганца – 71 %, цинка – 71 %, хрома – 87 %, клетчатки – 68 %». В продукции из пшеничной муки различных сортов содержится 1–2,5 % пищевых волокон (ПВ), при добавлении ржаной муки – до 3–5 %, при полной замене обычной пшеничной муки на цельнозерновую – до 8,5%. В пшеничных и других видах зерновых отрубей содержится около 50-60% ПВ. Поэтому добавление цельнозерновой муки и отрубей при оптимизации традиционных рецептур МКИ значительно повышает биологическую ценность вновь разрабатываемых изделий.

В работе [3] пшеничная мука частично заменена на кукурузную с добавкой порошка топинамбура в технологии сахарного печенья. Известна [4] технология применения кукурузной муки и порошка из ягод брусники для обогащения МКИ. Замена части пшеничной муки на кукурузную в объеме 40 % и порошка из высушенных ягод брусники в объеме 5,5 % [5]

положительно влияет на органолептические показатели качества, повышает пищевую ценность готового продукта.

В [6] используется нутовая мука, которая позволяет обогатить продукцию белками, пищевыми волокнами. Используется замена до 30% муки относительно базовой рецептуры. Для повышения содержания белков также могут использоваться гидролизаты бобовых культур [7], семена [8], ореховый шрот, добавки животного происхождения.

В [8] разработаны рецептуры с добавками семян масличных культур (льна, кунжута, подсолнечника) в количестве 7% от массы муки, это сказывается на повышении биологической ценности по белкам, ненасыщенным жирам, жирорастворимым витаминам, но влияет на режимы выпекания для получения конечного продукта высокого качества.

Диетические МКИ для больных сахарным диабетом проектируются с использованием растительного сырья, содержащего инулин, например, топинамбура, цикория, а также заменителей сахарозы – стевиозида или натуральных листьев стевии, их экстракта, фруктозы или других видов подсластителей, измельченных сухофруктов.

Известны [9, 10, 11, 12] технологические процессы с применением порошков из овощей, фруктов: моркови, свеклы, тыквы, лука, яблок, винограда. Установлено, что при добавлении растительных порошков в количестве 5-10% взамен сахара улучшаются вкус, аромат и цвет изделий при сохранении основных физико-химических показателей качества: влажность, намокаемость, упек. При использовании порошков из вторичного растительного сырья, в частности – порошков из выжимок фруктов, ягод, овощей, шротов масличных культур и орехов себестоимость добавок является низкой, что также снижает себестоимость производства конечного продукта при обогащении пищевыми волокнами, белками, микро- и макроэлементами, витаминами.

Известна технология обогащения печенья белком и пищевыми волокнами посредством включения в рецептуру тыквенной муки и пектинов, а также – технология изготовления бездрожжевых кексов с льняной мукой [13] (ТУ 9293-010- 89751414-2010 взамен части пшеничной муки, что способствует обогащению кексов омега-3 и омега-6, пищевыми волокнами и минеральными веществами. Льняная мука в пересчёте на сухое вещество содержит от 25 % до 40 % жира, до 20 % сырого протеина и до 3 % сырой клетчатки. Она имеет светло-серый или коричневый цвет, ореховый вкус, слабый специфический аромат [13]. Химический состав льняной муки [14] представлен в таблицах 1, 2. В льняной муке много веществ, которые не усваиваются в желудочно-кишечном тракте, но выводят из него токсины и холестерин, оказывают противовоспалительное действие. К ним относятся целлюлоза, фенольные полимеры, лигнины и т.п. [14].

Таблица 1. Химический состав льняной муки (пищевая ценность и содержание витаминов РР и группы В)

Наименование	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Пищевые волокна	Витамины В1, мг	Витамины В2, мг	Витамины В4, мг	Витамины В5, мг	Витамины В6, мг	Витамины В9, мг	Витамины РР
Содержание	36	10	9	30	1,8	0,18	86,6	1,08	0,52	95,7	3,34
Количество в % от суточной нормы	48,3	8,36	3	100	120	10	17,3	21,6	26	23,9	16,7

Таблица 2. Химический состав льняной муки (содержание микро- и макроэлементов)

Наименование	K, мг	Ca, мг	Mg, мг	P, мг	Fe, мг	Mn, мг	Se, мкг	Zn, мг
Содержание	894,3	280,5	431,2	706,2	6,3	2,73	27,94	4,8
Количество в % от суточной нормы	35,8	28,1	107,8	88,3	45	136,5	50,8	40

Ценным сырьем является овсяная мука. Она содержит большое количество незаменимых аминокислот, которые по своему составу близки к мышечному белку. Также в ее состав, входят тирозин, антиоксиданты, пищевые волокна, слизистые вещества, которые нормализуют процесс пищеварения, витамины группы В, например, В1 – 0,35 мг, В2 – 0,1 мг, В6 – 0,5 мг, В9 – 32 мг; витамин Е – 1,5 мг, РР – 4,3 мг [14], β – глюкан, а также минеральные элементы (молибден, кобальт, марганец, фтор, цинк, медь, железо, кальций, натрий, магний, калий, сера, фосфор), много клетчатки. Так в процентах от суточной потребности на 100 г муки: фосфор – 43,8%, магний – 27,5%, железо – 20%, калий – 11,2% [14].

Технология использования подсолнечной муки (5-20%) для повышения биологической ценности печенья описывается в работе [15]. Поскольку подсолнечная мука содержит до 10 % жира (в том числе $\omega 6$, $\omega 9$ жирные кислоты), возможно при ее использовании уменьшение вложения жирового компонента [15]. Добавка из семян эспарцета была включена в варианты рецептур в [16], ее использование позволило уменьшить количество сливочного масла соответственно количеству вложения добавки 5, 10, 15, 20%. Важно отметить, что в составе липидов семян эспарцета преобладают линоленовая (ω -3) и олеиновая (ω -9) кислоты.

Известны [17] технологические процессы с применением порошков из овощного и фруктово-ягодного сырья при производстве печенья. При использовании порошков из выжимок фруктов и овощей себестоимость добавок является низкой, что также снижает себестоимость производства конечного продукта [18]. Установлено, что при добавлении растительных порошков в количестве 10% взамен сахара улучшаются вкус, аромат и цвет печенья при сохранении основных физико-химических показателей качества: влажность, намокаемость, упек. Отмечено положительное влияние всех растительных порошков [17] на витаминную и минеральную ценность готовых изделий при увеличении содержания белков, пищевых волокон и повышении биологической ценности, что позволяет рекомендовать разработанные изделия для здорового питания различных категорий населения.

Известно, что благодаря содержанию фенольных соединений и эфирных масел антиоксидантную активность проявляют пряные растения и специи: гвоздика, мята перечная, имбирь, шалфей, календула, перец красный, анис, базилика, чеснок и др. [19]. Антиоксидантная активность специй на порядок выше антиоксидантной активности ягод и фруктов [20, 21].

Анализ научных публикаций относительно и свойств основного и дополнительного сырья для МКИ показал, что льняная мука повышает содержание в конечном продукте белков, антиоксидантов, пищевых волокон, витаминов, делает цвет готовых изделий более золотисто-насыщенным. Смесь различных видов муки кроме повышения пищевой ценности конечного продукта способствует улучшению реологических свойства теста. Специи целесообразно использовать при разработке рецептур МКИ, поскольку они способны замедлять окислительные процессы липидной фракции продукта для повышения качества и увеличению сроков хранения. Также специи добавляют в состав МКИ полезные для здоровья человека вещества, в том числе антиоксиданты, витамины, пищевые волокна, эссенциальную $\omega 3$ и $\omega 6$ жирные кислоты, фитонциды и др.

На кафедре «Пищевые технологии и оборудование» СевГУ разработана рецептура и технологический процесс МКИ функционального назначения повышенной биологической ценности и пониженной калорийности относительно базового варианта печенья овсяного ГОСТ 24901-2014. Ингредиенты нового продукта: мука пшеничная, овсяная, льняная, яйца, сливочное масло, разрыхлитель, соль, сахар, натуральные специи (корица, имбирь, куркума).

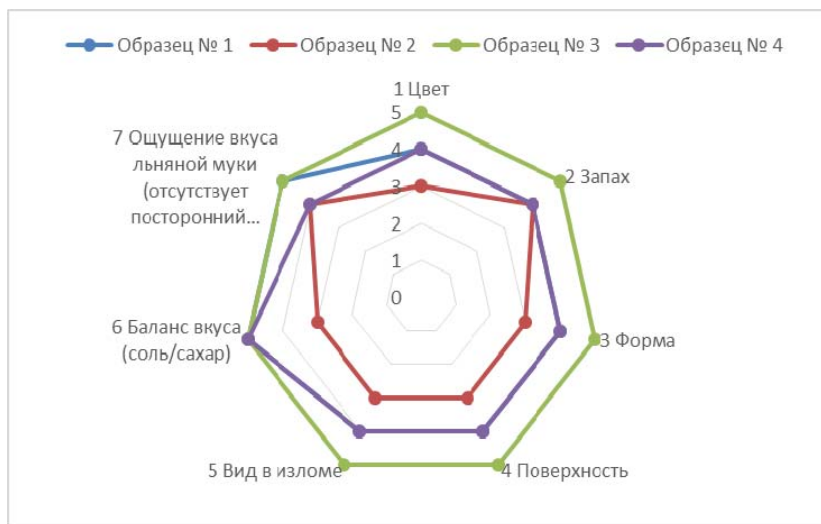


Рисунок 1. Соотношение показателей органолептической оценки для образцов контрольной выпечки нового МКИ

Проводилась контрольная выпечка для четырех вариантов рецептур, которые отличались вложением функциональных ингредиентов (яйцо куриное, овсяная и льняная мука, специи), другого сырья. Результаты органолептической оценки вариантов представлены на рисунке 1.

Оптимальным выбран вариант №3. Анализ физико-химических показателей нового печенья овсяного образцов контрольной выпечки и базового продукта показал, что они соответствуют нормативам по ГОСТ. Для нового МКИ массовая доля общего сахара и жира снижены соответственно на 21% и 12%, это способствует снижению калорийности продукта. Намокаемость контрольного образца была выше на 13%, чем базового варианта печенья, что говорит о достаточной пористости и однородности структуры конечного продукта. Исследовалось также изменение органолептических и физико-химических свойств нового варианта МКИ в процессе хранения. Определялись показатели через 15, 20, 25 дней.

Сравнение разработанного продукта с базовым показало прирост содержания белка более 20%, отмечен рост содержания важных для обмена веществ человека аминокислот (валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, цистеин, фенилаланин, тирозин) до 73%. Содержание насыщенных жирных кислот снижено на 53,73%, что является положительным изменением (продукт будет оказывать меньшее вредное воздействие на сердечно-сосудистую систему человека), повышено содержание витаминов B1, B2 соответственно на 46,15% и 50%. Увеличилось содержание железа на 67,58%, пищевых волокон на 2,27%, повышено содержание К на 26,97%, Са на 29,27%, Mg на 60,18%, P на 14,80%. Уменьшение содержания жиров и углеводов более чем на 33% и 24% на 100г соответствует снижению калорийности разработанного продукта, согласно заданию на проектирование.

Выводы. Таким образом, биологическая ценность нового МКИ повышена по целому ряду показателей, снижена калорийность на 15% относительно базового продукта, повышено содержание антиоксидантов. Превышение содержания важных нутриентов уровня 10-15%

нормы суточной физиологической потребности по Mg, P, Fe, B1, B2, содержанию белка соответствует тому, что печенье овсяное согласно разработанной рецептуре является функциональным продуктом питания.

Ведутся разработки и других рецептур МКИ на основе смесей различных видов муки, измельченных шротов масличных культур и орехов, фруктово-овощных добавок, которые позволят расширить ассортимент МКИ функционального назначения с повышенными потребительскими свойствами.

Список литературы

1. Разработка концепции производства снеков из пшеницы с элиминацией глютена биокаталитическим методом / А. Ю. Шариков, Е. Н. Соколова, М. В. Амелякина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 4(86). – С. 77-83.
2. Егорова, С. В. Опыт работы ОАО "Сергиево-посадского хлебокомбината" по выработке функциональных хлебобулочных изделий / С. В. Егорова, Д. Л. Костин // Наука и образование: проблемы и стратегии развития. – 2016. – № 1(2). – С. 168-170.
3. Першина, Т. А. Применение кукурузной муки и порошка из ягод брусники для повышения пищевой ценности мучных кондитерских изделий / Т. А. Першина, Е. Ю. Осипенко // Студенческие исследования - производству : Материалы 29-й студенческой научной конференции, Благовещенск, 11 ноября 2021 года / Отв. редактор А.И. Герасимович. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2021. – С. 227-234.
4. Калинкина, Н. О. Обогащение сдобного печенья белком и пищевыми волокнами / Н. О. Калинкина, Е. Ю. Егорова // Ползуновский вестник. – 2019. – № 1. – С. 17-22.
5. Влияние льняной муки на физико-химические свойства кексов на химических разрыхлителях / М. Б. Шарипова, М. Б. Икрами, Г. Н. Тураева, С. Т. Рузиева // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2023. – № 1(52). – С. 89-94.
6. Ключкова, И. С. Технология хлебобулочных изделий с использованием белоксодержащего растительного сырья / И. С. Ключкова, В. В. Давидович // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2018. – Т. 46, № 3. – С. 62-67.
7. Разработка технологии хлебобулочных изделий с введением горохового гидролизата / Е. С. Бычкова, Е. М. Подгорбунских, Л. Н. Рождественская [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2022. – № 3. – С. 56-66. – DOI 10.36107/spfp.2022.371.
8. Применение семян масличных культур в технологии приготовления пшеничного хлеба / Н. Н. Иванова, В. И. Каргин, Д. И. Иванов [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 4. – С. 92-99. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-4-92-99.
9. Обоснование применения растительных порошков в технологии мучных кондитерских изделий повышенной пищевой ценности / О. Л. Ладнова, А. В. Казаков, С. Я. Корячкина [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2021. – № 6(71). – С. 39-45.
10. Веселова, А. Ю. Разработка технологии хлебобулочного изделия функционального назначения / А. Ю. Веселова, А. П. Морозова // Пищевая индустрия. – 2021. – № 2(46). – С. 20-23. – DOI 10.24412/ci-34900-2021-2-20-23.
11. Еременко, Д. О. Определение функциональных свойств модельных систем рубленой мясной массы с добавлением полуфабриката из топинамбура и корня цикория / Д. О. Еременко, О. П. Чуб // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 2(203). – С. 246-252. – DOI 10.36718/1819-4036-2024-2-246-252.

12. Османова, Ю. В. Разработка технологии производства полуфабриката пребиотического действия из топинамбура и корня цикория / Ю. В. Османова, Д. О. Еременко, О. П. Чуб // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2023. – № 1. – С. 95-100. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-1-95-100.
13. Сакибаев, К. Ш. Использование льняной и пшеничной муки для выпечки кексов / К. Ш. Сакибаев // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Махачкала, 01–02 ноября 2016 года. – Махачкала: ИП Овчинников Михаил Артурович (Типография Алеф), 2016. – С. 94-97.
14. Бисчокова, Ф. А. Влияние смеси различных видов муки на качество хлебобулочных изделий / Ф. А. Бисчокова // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2020. – № 2(28). – С. 45-50.
15. Гайсина, В. А. Пищевая ценность сдобного печенья с подсолнечной мукой / В. А. Гайсина, Л. А. Козубаева, С. С. Кузьмина // Ползуновский вестник. – 2017. – № 2. – С. 19-22.
16. Тарасенко, Н. А. Влияние добавки порошка из семян эспарцета на функционально-технологические свойства сдобного печенья / Н. А. Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2016. – № 4(352). – С. 41-44.
17. Обоснование применения растительных порошков в технологии мучных кондитерских изделий повышенной пищевой ценности / О. Л. Ладнова, А. В. Казаков, С. Я. Корячкина [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2021. – № 6(71). – С. 39-45.
18. Чуб, О. П. Разработка десерта функционального назначения с использованием вторичного растительного сырья / О. П. Чуб, Д. О. Еременко // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 1. – С. 17-22.
19. Антиоксидантная активность специй и их влияние на здоровье человека (обзор) / Я. И. Яшин, А. Н. Веденин, А. Я. Яшин, Б. В. Немзер // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2017. – Т. 17, № 6. – С. 954-969.
20. Dragland S., Senoo H., Wake K., Holte K. et al., J Nutr., 2003, Vol. 133, pp. 1286-1290.
21. Самойлов А.В. Влияние антиокислителей в мицеллированной форме на продление сроков годности мучных кондитерских изделий // Кондитерское и хлебопекарное производство. – 2019. - № 7-8. – С. 40-44.

