

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ

«КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ»

Сборник материалов конференции

26 мая 2022 г.

Ярославль

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ярославский государственный технический университет»

**ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ:  
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ»**

26 мая 2022 г., Ярославль

Сборник материалов

Электронное издание

Ярославль  
2022

© Ярославский государственный технический университет, 2022  
ISBN 978-5-9914-0978-0

УДК 621  
ББК 34

**Компьютерно-интегрированные технологии в машиностроении: проблемы и перспективы:** 26 мая 2022 г., Ярославль : сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции, – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2022. – 127 с. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный.

Сборник содержит труды Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерно-интегрированные технологии в машиностроении: проблемы и перспективы» по следующим направлениям: технология машиностроения; информационные технологии и автоматизированные системы в машиностроении; технология и оборудование механической и физико-технической обработки; организация цифрового машиностроительного производства; управление качеством в машиностроении; проблемы подготовки специалистов для машиностроения.

Рецензенты: В.П. Марин, д-р техн. наук, профессор;  
Н.Н. Варюшкина, канд. техн. наук, ЗАО «ЦНИТИ  
«Техномаш-ВОС»

Минимальные системные требования:  
PC Pentium IV, 512 Мб ОЗУ, Microsoft Windows XP/7,  
Adobe Acrobat Reader, дисковод CD-ROM, мышь.

© Ярославский государственный технический университет, 2022

Программное обеспечение:  
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat

Программное обеспечение для воспроизведения электронного издания:  
Adobe Acrobat Reader, браузеры Google Chrome, Yandex

Редакционная коллегия: В.А. Иванова, К.И. Порсев, М.С. Ермаков

Редакторы В.Б. Доронина, О.А. Юрасова

Ответственные за электронные издания: М.А. Канакотина, Л.С. Кокина

Подписано к использованию/размещению на сайте  
23.08.2022

Объем издания: 3,08 Мб

Комплектация издания 1 CD-ROM

Ярославский государственный технический университет  
150023, г. Ярославль, Московский пр., 88  
<http://www.ystu.ru>

Контактный телефон: 8 (4852) 44-12-70

## СОДЕРЖАНИЕ

Д.И. Блёскин, М.С. Ермаков, А.В. Греков ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ЗАГОТОВКИ И ДЕТАЛИ ДЛЯ МОДЕЛИ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЯЧЕЙКИ.....	8
В.Б. Масыгин, Р.Л. Артюх, А.С. Серков РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПО РАЗМЕРАМ ЗАДАННОЙ ЗАГОТОВКИ.....	12
А.С. Клуонис, Д.Г. Сергеев, Е.В. Козлов ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЫЧЕК.....	20
О.Н. Калачев ОПЫТ РАЗВИТИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ПРОФИЛЮ «КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ».....	23
В.И. Сафонов ОБУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГРАФИКИ.....	26
О.Н. Калачев РАЗВИТИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ТМС И ВКР В КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ.....	31
М.В. Чугунов, И.Н. Полунина, И.А. Ермишов, А.А. Коткин РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ.....	36
О.Н. Калачев, Д.А. Калачева ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ.....	40
Е.С. Зимакова, Р.Н. Фадеев ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ.....	44
Э.И. Ясюкович ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ВАЛОВ.....	49
Р.А. Молчанов, А.В. Оборин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ ПРОТЯЖЕК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ.....	53

А.А. Кулебякин, Р.А. Молчанов СКВОЗНОЙ ПРОЕКТ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	57
А.А. Бычков СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ ЧПУ. MACH3 и NCSTUDIO.....	61
К.С. Ткаченко ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ УЗЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	65
М.Д. Гушин, Д.В. Остальцева, А.С. Погудина ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАЛОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА.....	69
Д.В. Шпилькин, А.М. Шапошников ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ.....	74
М.С. Ермаков, А.В. Соколов, М.А. Червочкин, В.В. Соловьев ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ.....	78
М.С. Ермаков, Л.О. Огурцов, А.В. Соколов, В.В. Соловьев ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯРНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ, ПРИСУТСТВУЮЩИХ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИСАДКАХ И МАСЛАХ НА ПРОЦЕСС АДСОРБЦИИ И ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	82
Л.О. Огурцов, М.А. Червочкин, А.В. Соколов, В.В. Соловьев ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПРИСАДОК И МАСЕЛ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ.....	87
М.А. Червочкин, В.В. Соловьев, Л.О. Огурцов, А.В. Кудричев ВЛИЯНИЕ ЭМУЛЬГАТОРОВ НА АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИОННЫХ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ.....	91

Л.О. Огурцов, М.А. Червочкин, В.В. Соловьев, А.В. Кудричев РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ АКВОЛ 14 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕЕ НА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКАХ С ЧПУ.....	95
А.Р. Агелиев, М.Г. Слободянский АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВКЛАДЫШЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ.....	99
Е.И. Елисейкин, Р.Х. Рафиков, В.А. Изотов ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЕЧАТАННОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ.....	103
Р.Х. Рафиков, С.А. Горovenko, Г.А. Гелашвили, М.А. Сивов ОБ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ КОМПОНЕНТОВ ЛОКОМОТИВОВ.....	107
Н.А. Ляпичев, Э.Р. Халилов, Н.Е. Садковская ОПТИМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ.....	110
Р.О. Мазуркевич, Н.Е. Садковская ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	114
В.Г. Лисичкин, Н.В. Лисичкина О ПОВЫШЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ.....	118
О.С. Ломова ОПТИМИЗАЦИЯ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЦЕНТРОВ.....	123

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТА ЗАГОТОВКИ И ДЕТАЛИ ДЛЯ МОДЕЛИ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЯЧЕЙКИ**

**Д.И. Блёскин, М.С. Ермаков, А.В. Греков**

Ярославский государственный технический университет

*В статье рассматривается создание макета заготовки и детали на консольно-фрезерном вертикальном станке модели 6P11 для модели гибкой производственной ячейки.*

***Ключевые слова:** заготовка, деталь, механообработка, фрезерование, станок, режущий инструмент.*

## **MANUFACTURING OF THE PROTOTYPE OF A WORKPIECE AND A PART FOR A MODEL OF A FLEXIBLE PRODUCTION CELL**

**D.I. Bleskin, M.S. Ermakov, A.V. Grekov**

Yaroslavl State Technical University

*The article discusses the manufacturing of a workpiece and a part on a knee and column vertical milling machine model 6P11 for a flexible production cell model.*

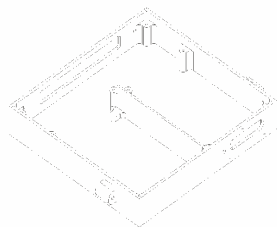
***Key words:** blank, detail, milling, machine, cutting tool, flexible production cell.*

Обработка заготовок из металла и других материалов, получение детали, и придание ей нужной функциональной формы и размеров, с применением режущего инструмента и механического воздействия на обрабатываемый объект называется механообработкой. Процесс механообработки осуществляется на специальных металлорежущих станках. Механообработка металла находит применение во многих отраслях промышленного производства и позволяет создать деталь практически любой формы и размеров [1].

Для работы ранее изготовленной модели гибкой производственной ячейки (ГПЯ) [2], представляющей собой автоматизированную транспортно-складскую систему, необходимо было изготовить макеты заготовки и детали, подлежащие транспортировке и складированию. В каче-



стве изготавливаемой в ГПЯ детали была выбрана деталь «Корпус» для радиоэлектронной аппаратуры (рис. 1).



**Рис. 1. 3Dмодель детали «Корпус»**

Для создания уменьшенной копии детали «Корпус» было принято решение изготовить деталь путём фрезерования и последующей слесарной обработки. Фрезерная обработка металла представляет собой резку поверхности металла при помощи фрез различных диаметров. При фрезеровании происходит снятие стружки с поверхности заготовки, при помощи вращающегося многолезвийного инструмента. Режущие кромки зубьев фрезы, находятся в прерывистом контакте с обрабатываемым металлическим изделием.

Создание корпуса началось с поиска подходящей по размеру и материалу заготовки (рис. 2).



**Рис. 2. Алюминиевая заготовка**

Далее выбранная в качестве заготовки деталь из алюминия подверглась резанию с помощью угловой шлифовальной машины (УШМ). Полученная после резания заготовка была разделена на два равных прямо-

угольных параллелепипеда. После резания, с использованием УШМ, требовалось подготовить заготовку к дальнейшему фрезерованию. Была проведена слесарная обработка граней и фасок заготовок на шлифовальном станке. Для операции фрезерования был выбран консольно-фрезерный вертикальный станок модели 6P11 производства Дмитровского завода фрезерных станков (рис. 3).



**Рис. 3. Консольно - фрезерный вертикальный станок 6P11**

В качестве режущего инструмента была выбрана торцевая фреза со сменными пластинами (рис. 4).



**Рис. 4. Торцевая фреза со сменными пластинами**

Фрезерование велось за шесть установов. На каждый установ пришлось по два черновых и один чистовой проход. После этого были проведены слесарные операции (рис. 5, *а*). В результате было получено два макета заготовок, один из которых подвергся дальнейшей обработке концевыми фрезами диаметрами 5,3 мм. Получившийся макет детали был доведен до окончательного состояния слесарной операций (рис. 5, *б*).



*a*



*b*

**Рис. 5. Макет заготовки до слесарной обработки (а), готовые макеты заготовки и детали (б)**

Изготовленные макеты заготовки и детали будут применяться в качестве перемещаемого транспортным роботом и роботом манипулятором груза в модели гибкой производственной ячейки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механообработка. Опытное машиностроительное производство OMPSPB.RU. URL: <https://www.ompspb.ru/info/mehanoobrabotka.php>.
2. *Блёскин, Д.И.* Внедрение робота-манипулятора в модель гибкой производственной ячейки / Д.И. Блёскин, М.С. Ермаков. // Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях: Материалы Международной научно-практической конференции, Зеленоград, 25–26 ноября 2021 года. Москва: Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 2021. С. 10-14.

## РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПО РАЗМЕРАМ ЗАДАННОЙ ЗАГОТОВКИ

**В.Б. Масыгин, Р.Л. Артюх, А.С. Серков**

Омский государственный технический университет

*Рассматривается практический автоматизированный расчет линейных технологических размеров по методике, предусматривающей в качестве исходных данных размеры заготовки. Методика основывается на составлении размерных цепей и графа общих припусков, определении их параметров и разделении на операционные припуски также с определением их соответствующих общим припускам параметров.*

**Ключевые слова:** размерная цепь, заготовка, припуск, граф.

## CALCULATION OF LINEAR TECHNOLOGICAL DIMENSIONS BY THE SIZE OF A GIVEN WORKPIECE

**V.B. Masyagin, R.L. Artyukh, A.S. Serkov**

Omsk State Technical University

*A practical automated calculation of linear technological dimensions is considered according to a technique that provides for the dimensions of the workpiece as initial data. The methodology is based on the compilation of dimensional chains and a graph of general allowances, the determination of their parameters and the division into operational allowances also with the determination of their corresponding general allowances parameters.*

**Keywords:** dimensional chain, workpiece, allowance, graph.

Большое значение при технологической подготовке производства имеют технологические размерные расчёты [1, 2], которые, как известно, во-первых, обеспечивают получение размерно-точностных параметров технологического процесса, во-вторых, их правильность является определяющей в вопросе обеспечения качества и экономичности производства.

Практической и теоретической проблемой размерных расчетов является то, что существующие базовые методики расчета технологических

размеров основаны на том, что точностные параметры заготовки являются исходными данными, а размерные – получаются в результате расчета. В то же время существующий стандарт на проектирование заготовок позволяет сразу определить все – точностные и размерные параметры заготовки по чертежу детали без выполнения технологических размерных расчетов. В этом случае заготовка может проектироваться и изготавливаться параллельно с проектированием технологического процесса механической обработки, что значительно сокращает длительность технологической подготовки производства.

Для решения данной проблемы была разработана на базе методики расчета линейных технологических размеров с применением аппарата теории графов Б.С. Мордвинова [1] методика автоматизированного расчета линейных технологических размеров с принятием номинальных размеров заготовки как исходных данных при расчете [3], в которые должны «вписаться» операционные технологические размеры. Разработанная методика предусматривает ряд новых этапов, связанных с расчетом параметров общих припусков. Во-первых, методика базируется на определении по стандарту размерно-точностных параметров заготовки; во-вторых, выполняется расчет параметров общих припусков и на основе полученных значений определяются исходные данные для дальнейшего расчета операционных технологических размеров, а именно, минимальные операционные припуски и операционные допуски. После чего выполняется стандартный проектный и проверочный расчет технологических размеров.

В статье рассматривается практический пример применения разработанной методики расчета линейных технологических размеров.

На основе соответствующего стандарта (ГОСТ 7505-89) по размерам рабочего чертежа детали ( $S_1 = 105_{-0,22}$ ,  $S_2 = 20_{-0,052}$ ) производится проектирование заготовки (рис. 1, а), в результате чего получают размерно-точностные параметры заготовки:

$$A_{0,1} = 109_{-0,5}^{+1,1}; A_{0,2} = 33_{-0,5}^{+1,1}.$$

Затем в соответствии с известными методиками расчета технологических размерных цепей [1, 2] выполняется построение схемы припусков (рис. 1, а) и графов размерных цепей заготовки (рис. 1, б). Новые неизвестные замыкающие звенья здесь – общие припуски на обработку  $Z_{общ,1}$ ,  $Z_{общ,2}$ ,  $Z_{общ,3}$  для которых составляются уравнения размерных цепей, содержащие составляющие звенья – известные размеры заготовки  $A_{0,i}$  и конструкторские размеры  $S_j$ .

По графу составляются системы уравнений размерных цепей для

расчета средних общих припусков  $Z_{общ}$  и для погрешностей общих припусков  $\delta Z_i$

$$\begin{cases} Z_{общ1} - A_{0,1} + Z_{общ3} + S_1 = 0; \\ Z_{общ2} - A_{0,2} + Z_{общ3} + S_2 = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} \delta Z_{общ1} = \delta A_{0,1} + \delta Z_{общ3} + \delta S_1; \\ \delta Z_{общ2} = \delta A_{0,2} + \delta Z_{общ3} + \delta S_2 \end{cases} \quad (1)$$

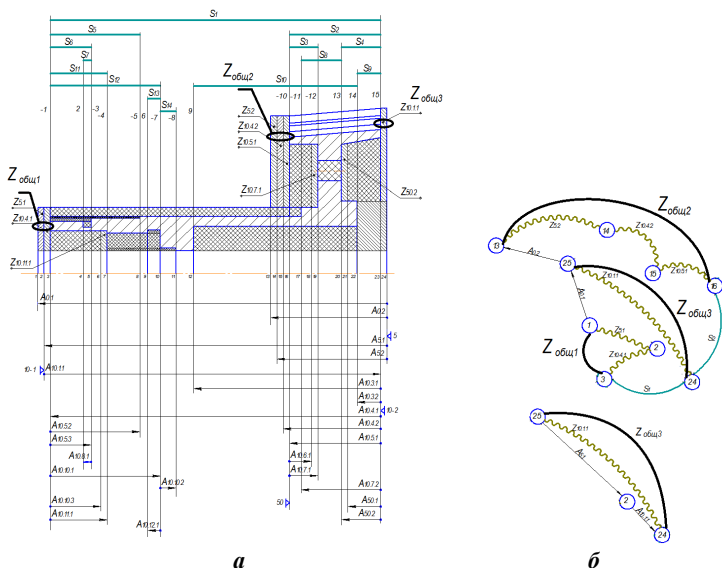


Рис. 1. Схема припусков (а) и графы размерных цепей заготовки (б)

Минимальные возможные значения общих припусков получаются суммированием соответствующих назначаемых по справочнику минимальных значений операционных припусков. Минимальные операционные припуски зависят от степени обработки поверхности детали (например, в данном случае, принимаем 0,49 мм при первой обработке, 0,20 мм при второй и 0,05 мм при третьей):

$$\begin{aligned} Z_{общ3}^{\min} &= Z_{10.1.1}^{\min} = 0,49 \text{ мм}; & Z_{общ1}^{\min} &= Z_{5.1}^{\min} + Z_{10.4.1}^{\min} = 0,49 + 0,20 = 0,69 \text{ мм}; \\ Z_{общ2}^{\min} &= Z_{3.2}^{\min} + Z_{10.4.2}^{\min} + Z_{10.5.1}^{\min} = 0,49 + 0,20 + 0,05 = 0,74 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Погрешности общих припусков определяются при помощи уравнений (1) на основе погрешностей размеров, входящих в уравнения, за исключением погрешности общего припуска на исходной базе  $Z_{общ3}$ , которая получается суммированием погрешностей операционных при-

пусков, образующих замкнутый контур на графе (рис. 1, б) с общим припуском, которые, в свою очередь, получаются как сумма допусков соответствующих операционных размеров:

$$\delta Z_{общ3} = \delta Z_{10.1.1} = \delta A_{5.1} + \delta A_{10.1.1} = 0,94 + 0,35 = 1,29 \text{ мм};$$

$$\delta Z_{общ1} = \delta A_{0.1} + \delta Z_{общ3} + \delta S_1 = 1,6 + 1,29 + 0,22 = 3,11 \text{ мм};$$

$$\delta Z_{общ2} = \delta A_{0.2} + \delta Z_{общ3} + \delta S_2 = 1,6 + 1,29 + 0,052 = 2,942 \text{ мм}.$$

Далее по уравнениям (1) определяются значения средних общих припусков и действительных минимальных общих припусков. Средние размеры чертежа и заготовки, ( $S_1^{cp} = 104,89$ ;  $S_2^{cp} = 28,974$ ;  $A_{0.1}^{cp} = 109,3$ ;  $A_{0.2}^{cp} = 33,3$ ) входящие в уравнения (1), рассчитываются по заданным чертежным размерам и размерам заготовки.

$$Z_{общ3}^{cp} = Z_{общ3}^{min} + 0,5\delta Z_{общ3} = 0,49 + 0,5 * 1,29 = 1,135 \text{ мм};$$

$$Z_{общ1}^{cp} = A_{0.1}^{cp} - Z_{общ3}^{cp} - S_1^{cp} = 109,3 - 1,135 - 104,89 = 3,275 \text{ мм};$$

$$Z_{общ2}^{cp} = A_{0.2}^{cp} - Z_{общ3}^{cp} - S_2^{cp} = 33,3 - 1,135 - 28,974 = 3,191 \text{ мм};$$

$$Z_{общ1}^{min} = Z_{общ1}^{cp} - 0,5\delta Z_{общ1} = 3,275 - 0,5 * 3,11 = 1,72 \text{ мм} > 0,69;$$

$$Z_{общ2}^{min} = Z_{общ2}^{cp} - 0,5\delta Z_{общ2} = 3,661 - 0,5 * 2,942 = 2,19 \text{ мм} > 0,74.$$

Рассчитанные значения действительных минимальных общих припусков разделяются на составляющие в зависимости от числа обработок в соответствии с коэффициентом  $K_i$ , (табл. 1), тем самым определяются значения действительных минимальных операционных припусков. Полученные значения минимальных операционных припусков являются исходными данными для дальнейшего расчета линейных операционных технологических размеров.

**Таблица 1. Расчет действительных минимальных операционных припусков**

Действительный минимальный общий припуск			Действительный минимальный операционный припуск			
Индекс	Кол-во обработок	Значение, мм	Индекс	Номер обработки	Коэффициент	Значение, мм
$Z_{общ1}^{\delta min}$	2	1,72	$Z_{5.1}^{\delta min}$	1	5/7	1,23
			$Z_{10.4.1}^{\delta min}$	2	2/7	0,49
$Z_{общ2}^{\delta min}$	3	1,43	$Z_{5.2}^{\delta min}$	1	5/8	0,89
			$Z_{10.4.2}^{\delta min}$	2	2/8	0,36
			$Z_{10.5.1}^{\delta min}$	3	1/8	0,18

$Z_{общ3}^{o\min}$	1	0,49	$Z_{10.1.1}^{o\min}$	1	1	0,49
--------------------	---	------	----------------------	---	---	------

Следующий шаг - выполнение подгонки предварительно назначенных по справочным данным значений операционных допусков, которые должны обеспечить требуемые погрешности общих припусков.

Подгонка операционных допусков заключается в их обоснованном изменении в большую или меньшую сторону. Для этого используется информация об ожидаемых погрешностях конструкторских размеров и операционных припусков, полученная с применением программы автоматизированного расчета линейных технологических размеров «DIAMOND» [4]. Ожидаемые погрешности операционных припусков, которые входят в соответствующий общий припуск, путем суммирования позволяют составить выражение для вычисления соответствующих общих припусков.

Те погрешности общих припусков, которые по результатам суммирования погрешностей операционных припусков имеют значения меньше или больше расчетного, требуют выполнить подгонку изменением операционных допусков.

Ожидаемые погрешности общих припусков в данном случае равны:

$$\begin{aligned} \rho Z_{общ1} &= \rho Z_{5.1} + \rho Z_{10.4.1} = (\delta A_{0.1} + \delta A_{5.1}) + (\delta A_{10.4.1} + \delta A_{10.1.1}) = 3,1 \text{ мм}; \\ \rho Z_{общ2} &= \rho Z_{5.2} + \rho Z_{10.4.2} + \rho Z_{10.5.1} = (\delta A_{0.2} + \delta A_{5.2}) + (\delta A_{5.2} + \delta A_{5.1} + \delta A_{10.1.1} + \delta A_{10.4.2}) + \\ &+ (\delta A_{10.4.2} + \delta A_{10.5.1}) = 3,982 \text{ мм}; \end{aligned}$$

Так как рассчитанные действительные допуск и операционных припусков в первом случае равны, а во втором меньше ожидаемой погрешности, то потребуются подгонка только некоторых технологических допусков путем сжатия, и, возможно, расширения, для компенсации сжатия погрешности общего припуска  $\rho Z_{общ2}$ .

$$\begin{aligned} \rho Z_{общ1} &= 3,1 \text{ мм} \leftrightarrow 3,1 \text{ л(неизменно)}; \\ \rho Z_{общ2} &= 2,942 \text{ мм} \leftarrow 3,982 \text{ (сжатие на } 1,040); \end{aligned}$$

Как показал анализ допусков, расширение допусков может оказаться невозможным, так как при этом могут измениться допуски, имеющие уже зафиксированные значения. Необходимо изменить следующие значения технологических допусков (табл. 2).



**Таблица 2. Подгонка операционных допусков**

Индекс размера	было	стало
$\delta A_{10,1.1}$	0,35	0,87
$\delta A_{5,2}$	0,39	0,15
$\delta A_{5,1}$	0,94	0,42

После подгонки операционных допусков выполняется автоматизированный проектный расчет технологических размеров с применением программы «DIAMOND». При получении по результатам расчета размеров заготовки, которые отличаются от рассчитанных на основе стандарта размеров (табл. 3), они заменяются определяемыми по стандарту размерами и выполняется автоматизированный проверочный расчет технологических размеров с помощью программы «DIAMOND-B» [4] с целью получения информации об обеспечении минимальных операционных припусков. Проверочный расчет выполняется по известной методике, предназначенной для решения обратной задачи размерных расчетов, с использованием тех же исходных данных, как и при прямом расчете с помощью программы «DIAMOND», с дополнением исходных данных номинальными значениями технологических размеров и их отклонений.

Для рассматриваемого случая все действительные минимальные операционные припуски обеспечиваются. В случае не обеспечения выполняется перераспределение действительных минимальных общих припусков для увеличения не обеспечиваемых действительных минимальных операционных припусков, и, вследствие этого, действительных минимальных операционных припусков. После чего расчет повторяется до тех пор, пока не будут обеспечены минимально требуемые операционные припуски.

**Таблица 3. Линейные технологические размеры, полученные по методике Б.С. Мордвинова, и исходя из размеров заданной заготовки**

Индекс р-ра	По Б.С. Мордвинову			По предлагаемой методике			Границы р-ра	
	Номин.	Верхн. откл.	Нижн. откл.	Номин.	Верхн. откл.	Нижн. откл.	Лев.	Пр.
0.01	108.00	1.100	-0.500	109.10	1.100	-0.500	1.0	-15.0
0.02	33.10	1.100	-0.500	33.10	1.100	-0.500	10.0	-15.0
5.01	107.00	0.000	-0.940	107.35	0.000	-0.420	1.1	-15.0
5.02	32.05	0.000	-0.390	31.65	0.000	-0.150	10.1	-15.0
10.01	105.55	0.000	-0.350	106.40	0.000	-0.870	1.1	-15.1
10.02	56.10	0.300	0.000	56.10	0.260	0.000	-9.1	-15.1
10.03	6.20	0.150	0.000	6.20	0.150	0.000	-14.1	-15.1

11.01	105.00	0.000	-0.220	105.00	0.000	-0.220	1.2	-15.1
11.02	29.65	0.000	-0.130	29.30	0.000	-0.100	10.2	-15.1
11.03	29.00	0.000	-0.052	29.00	0.000	-0.052	10.3	-15.1
11.04	31.40	0.160	0.000	31.40	0.160	0.000	1.2	5.1
11.05	14.40	0.110	0.000	14.40	0.110	0.000	1.2	3.1
11.06	8.50	0.202	0.000	8.50	0.202	0.000	10.3	12.1
11.07	8.95	0.036	0.000	8.95	0.036	0.000	10.3	12.2
11.08	23.60	0.000	-0.052	23.60	0.000	-0.052	11.1	-15.1
11.09	2.90	0.200	0.000	2.90	0.200	0.000	-2.1	3.1
11.10	34.88	0.250	0.000	34.88	0.250	0.000	1.2	7.1
11.11	3.90	0.120	0.000	3.90	0.120	0.000	7.1	8.1
11.12	14.50	0.180	0.000	14.50	0.180	0.000	1.2	4.1
11.13	14.90	0.110	0.000	14.90	0.110	0.000	1.2	4.2
11.14	4.00	0.120	0.000	4.00	0.120	0.000	-6.1	7.1
50.01	12.00	0.232	0.000	12.00	0.232	0.000	-13.1	-15.1
50.02	12.44	0.043	0.000	12.44	0.043	0.000	-13.2	-15.1

Анализ полученных результатов. Полученные по окончании расчета на ЭВМ значения минимальных операционных припусков показаны на диаграмме (рис. 2).

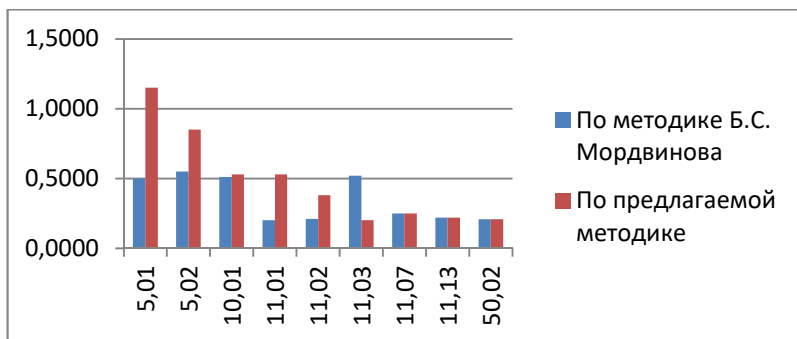


Рис. 2. Результаты проверочного расчета технологических размеров для двух методик (минимальные операционные припуски)

Анализ значений минимальных операционных припусков показывает, что рассчитанные по двум методикам минимальные операционные

припуски отличаются, особенно на первых операциях. Это означает, что учет размеров заданной заготовки будет влиять на припуски на начальных операциях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мордвинов, Б.С.* Расчет технологических размеров при проектировании технологических процессов механической обработки: учеб. пособие / Б.С. Мордвинов, Е.С. Огурцов. Омск: ОмПИ, 1975. 160 с.
2. *Калачёв, О.Н.* Интерактивное моделирование размерных изменений заготовки при проектировании технологического процесса механообработки // Информационные технологии. 2001. № 2. С. 10-14.
3. *Бартоломей, В.А.* Методика расчета линейных технологических размеров на основе размерных и точностных данных о заготовке / В.А. Бартоломей, В.Б. Масыгин // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. 2011. № 1(97). С. 41-45.
4. *Масыгин, В.Б.* Автоматизированный расчет линейных технологических размеров при проектировании и анализе технологических процессов механической обработки // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Машиностроение – традиции и инновации (МТИ-2013)»: сб. докладов. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2013. С. 100-106.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЫЧЕК**

**А.С. Клуонис, Д.Г. Сергеев, Е.В. Козлов**

Вятский государственный университет

*В работе рассмотрены основные методы получения мелкоразмерных профильных деталей, приведен сравнительный анализ каждого из них. Также разработана технология механической обработки малогабаритных деталей с использованием перемычек. Основным технико-экономическим результатом является сокращение времени обработки, экономия трудовых и материальных ресурсов на изготовление технологической оснастки.*

***Ключевые слова:** мелкоразмерные профильные детали, фрезерование, перемычки.*

## **MANUFACTURING TECHNOLOGY OF SMALL PROFILE PARTS USING BRIDGES**

**A.S. Kluonis, D.G. Sergeev, E.V. Kozlov**

Vyatka State University

*The paper considers the main methods for obtaining small-sized profile parts, a comparative analysis of each of them is given. A technology for machining small-sized parts using bridges has also been developed. The main technical and economic result is a reduction in processing time, saving labor and material resources for the manufacture of technological equipment.*

***Keywords:** small profile parts, milling, bridges.*

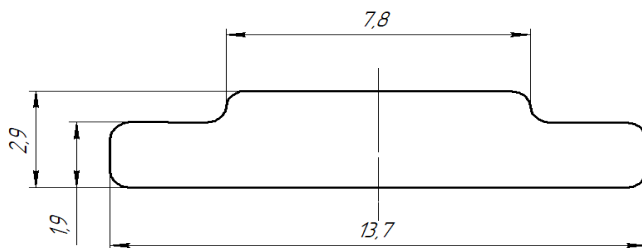
Номенклатура деталей, входящих в различные изделия авиационной, медицинской и электронной промышленности, стремится к постоянному уменьшению размеров, что в дальнейшем приводит усложнению геометрической формы. Существует большое количество технологических методов обработки мелкоразмерных деталей, как например: электроэрозионная обработка, лазерная резка и фрезерование. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки, так обработка лазером и инструментом-электродом позволяет изготавливать высокоточные сложнопрофильные детали из различных твердых материа-

лов [1]. Наряду с этим данные технологии энергозатратны, что вызывает высокую стоимость обработки, также при электроэрозионных методах обработки невозможно производство деталей из немагнитных материалов, которые, в большинстве случаев, используются в вышеперечисленных отраслях промышленности. При обработке мелкоразмерных деталей на лазерном станке может произойти обугливание кромок и потеря физических свойств металла ввиду высокой температуры во время обработки [1]. Обработка на фрезерном станке низкзатратна и осуществляется инструментами, предназначенными для обработки различных материалов с заданными техническими требованиями. Это обуславливает универсальность данного метода по сравнению с электроэрозионной и лазерной обработкой. При изготовлении мелкоразмерных деталей на фрезерных станках с ЧПУ возникает сложность закрепления детали при вырезании из заготовки [2]. Применение вакуумных и магнитных невозможно из-за малой площади контакта с вырезаемой деталью, то есть при завершении вырезания она может сместиться, что приведет к браку и возможной поломке инструмента.

Целью данной работы является разработка технологии изготовления мелкоразмерных профильных деталей с перемычками.

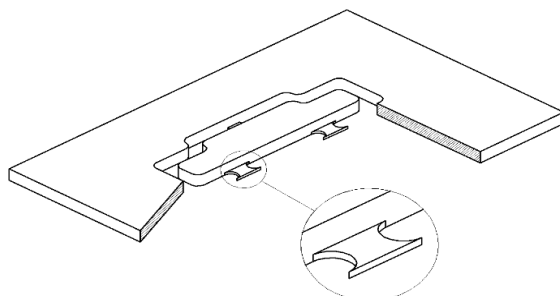
Перемычки – это тонкие мостики, получаемые на последних проходах фрезы, которые соединяют деталь с заготовкой и удаляются на последующих операциях [3]. Они должны быть небольшого сечения для упрощения их удаления без дефектов. Однако при уменьшении размера перемычки снижается жесткость скрепления, что приводит к вырыванию заготовки и разрушению фрезы. Поэтому большую роль при фрезеровании мелкоразмерных деталей играют правильно подобранные режимы резания.

Процесс обработки рассмотрен при изготовлении детали, представленной на рис.1.



**Рис. 1. Мелкоразмерная профильная деталь**

Деталь имеет небольшие габаритные размеры при толщине 1 мм. Обработка ведется концевой фрезой диаметром 1 мм. В результате расчетов было принято решение изготавливать деталь тремя перемычками 1 мм длиной и 0,3 мм высотой. Деталь с перемычками после обработки представлена на рис. 2. Экспериментально установлено, что обработка с заданными техническими требованиями при установленном количестве и размерах мостиков возможна.



**Рис. 2. Деталь с перемычками после обработки**

Перемычки на готовых деталях имеют небольшую толщину, поэтому могут быть легко выломаны пинцетом или обработаны гравером.

Таким образом, предложенная методика позволяет обрабатывать мелкогабаритные профильные детали на фрезерных станках с ЧПУ без проектирования и изготовления технологической оснастки, тем самым сокращая время и стоимость технологического процесса. Также при данной технологии возможна обработка детали с 5 сторон за один установ, что обеспечивает высокую точность взаимного расположения поверхностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абляз, Т.Р. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие / Т.Р. Абляз, А.М. Ханов, О.Г. Хурматуллин. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 121с.
2. Фролов, В.К. Аналитическое решение задачи определения упругих деформаций инструмента при контурном фрезеровании концевыми фрезами / В.К. Фролов, М.Н. Гладский // *Вестник НТУУ КПИ. Сер. Машиностроение*. 2011. №. 63. С. 171–174.
3. Ермолаев, М.М. Метод расчета перемычек при фрезерной обработке / М.М. Ермолаев, И.Л. Волчкевич, Е.Г. Полканов, П.А. Быков // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. №. 6 (675). С. 3-12.

## **ОПЫТ РАЗВИТИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ПРОФИЛЮ «КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»**

**О.Н. Калачев**

Ярославский государственный технический университет

*Рассмотрены оснащение кафедры КИ ТМС ЯГТУ цифровыми устройствами: станками с ЧПУ, 3D-сканирования и печати; программируемыми транспортными и манипуляционными системами, оборудованием лазерной резки и AR. Отмечены изменения учебных планов и реализация компетенций Индустрии 4.0 в условиях использования перечисленного оборудования в аудиторном учебном процессе и на этапе ГИА.*

***Ключевые слова:** CAD/CAM; 3D-принтер; 3D-сканер; станок ЧПУ; лазерная резка; AR; робот-манипулятор; транспортная тележка; Arduino*

## **EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE PROFILE «COMPUTER-INTEGRATED MECHANICAL ENGINEERING»**

**O.N. Kalachev**

Yaroslavl State Technical University

*The equipment of the Ci TMS YSTU with digital devices is considered: CNC machines, 3D scanning and printing; programmable transport and manipulation systems, laser cutting equipment and AR. Changes in curricula and the implementation of the competencies of India 4.0 in the conditions of using the listed equipment in the classroom educational process and at the GIA stage were noted.*

***Keywords:** CAD/CAM; 3D printer; 3D scanner; CNC machine; laser cutting; AR; robot manipulator; transport trolley; Arduino.*

Вступление в эпоху Индустрии 4.0 предъявляет жесткие требования к формированию дополнительных компетенций в области цифровой трансформации машиностроительных производств. В середине 90-х годов коллектив кафедры «Технология машиностроения» ЯПИ в единичных попытках применения САПР на Ярославских заводах «ИФО» и «ЯМЗ» осознал тенденцию мирового развития в машиностроении и

предложил новую специализацию «Компьютерно-интегрированное машиностроение»[1].

Учебный процесс кафедры, имевшей к тому времени опыт использования на ЕС ЭВМ пакета Графор (ИПИМ им. М.В. Келдыша АН СССР) и САПР ТП «Вал» (ИТК АН БССР), в 1992 г. был переведен на персональные ЭВМ с программным обеспечением AutoCAD, «АРМ Технолога» (Новосибирск), СУБД Foxbase, САПР ЧПУ (Пермь), а также собственную разработку KON7 (хд с «ЯМЗ») [2]. Первой CAD/CAM-системой для ПК на кафедре стал приобретенный ректоратом Cimatron it [3], а первая кафедральная сеть на протоколе TCP/IP была профинансирована нашим выпускником, известным предпринимателем Я.С. Якушевым.

В 2012 г. университет по инициативе кафедры заключил соглашение о стратегическом партнёрстве с компанией Autodesk, и при кафедре был создан Образовательный Центр Autodesk. Открытие Центра CAD/CAM/PLM-технологий позволило дипломникам и магистрантам кафедры выполнить ряд НИР на основе применения CAD/CAM/PLM: PTC (Creo), Siemens PLM Software (NX), АСКОН (Вертикаль и ЛОЦ-МАН) и др.

В 2013 г. проект цифрового прототипа импульсного вариатора дипломника Е. Емельянова в CADInventor удостоен Диплома 2 степени на конкурсе Autodesk, в 2014 г. дипломник О. Екимов по заданию «Центра перспективных технологий и аппаратуры» (Москва) выполнил проект цифрового прототипа валкового пресса, опубликованный в журнале ВАК «Сборка в машиностроении» [4].

В 2014 г. году с участием выпускников-магистров при кафедре открыто МИП «АйТиТехмаш», которое в течение последних лет выполнило заказы по формированию электронных баз данных (ИЦ Желдорремаш), электронных пособий (ЯЭРЗ), проектированию литейной оснастки (РОМЗ), разработку конструкторской документации и подготовку к переходу на ЕИП («Пролетарская свобода»), ведение КИС («Автодизель»).

По заданию ректората в 2011 г. на кафедре прорабатывался проект создания инновационного Центра прототипирования ЯГТУ, был проведен семинар московских RP компаний «Какой 3D-принтер нужен ЯГТУ?» [5].

В том же году, после 20 лет бездействия кафедральных промышленных станков с ЧПУ, мы получили от спонсоров настольный фрезерный станок с ЧПУ, и УП для изготовления детали – подготовленные в CAD/CAMCimatron УП на ЛР теперь тестируются на новом станке.

В 2019 г. МИП «АйТиТехмаш» профинансировал модернизацию координатографа Машприбор (привод, шпиндель, драйвера управления, система охлаждения и блок питания) – появился еще один вертикально-



фрезерный станок с ЧПУ с большим столом. Этому проекту модернизации, реализованному в ВКР двух студентов, было присуждено 1 место на молодежной конференции «Группы ГАЗ» в Н. Новгороде.

В 2015 г. по нашей инициативе на кафедре были перемещены остатки полигона роботов-манипуляторов советских времен. В 2016 г. на кафедре появился первый 3D-сканер, и намеченная в 2011 г. мини-программа создания кафедральной лаборатории «Цифрового и быстрого прототипирования» была реализована. В результате были выполнены две магистерские работы, тематика которых теперь развивается нашими выпускниками-аспирантами, но... в других вузах. Один из этих магистров занял в 2020 г. первое место в Хакатоне ОДК и ОДК Сатурн, Ростеха в составе команды университета.

В конце 2018 г. МИП «АйТиТехмаш» приобрел «Автоматизированную сборочно-сортировочную систему» на базе робота-манипулятора с цилиндрической зоной обслуживания PASKAL OMEGA 1-3X(H)-USB-ARM DUINO. С устройством поставлено 14 лабораторных работ.

В самом конце 2019 г. МИП «АйТиТехмаш» профинансировал программируемую в Ардуино тележку для проекта моделирования производственной транспортной системы, освоенную в ходе ВКР будущим ассистентом кафедры М. Ермаковым. Весной 2021 г. при поддержке дирекции института инженерии и машиностроения кафедра купила портативный, программируемый в Ардуино, робот-манипулятор, с появлением которого новое направление НИР на кафедре обрело реальные очертания. Близка к завершению первая ВКР, в которой два устройства используются совместно [7].

Еще оно инновационное направление на кафедре – развитие приложений дополненной реальности AR – было задумано в 2018 г., когда МИП купил очки EPSON, которые тогда же были опробованы в ВКР. Осенью прошлого года нами был организован в «Точке кипения» ЯГТУ семинар специалиста компании PTS. ПАО «Автомобиль» предоставил лицензию на продукты PTS для выполнения одной из этих ВКР. В текущем году три дипломника подготовили ВКР и выступления на «Гагаринских чтениях» по трем направлениям развития AR.

И, наконец, последнее по времени приобретение МИП «АйТиТехмаш» – станок для лазерной резки листовых материалов.

Обнащение кафедры разнообразным цифровым оборудованием и приобретённый опыт работ по договорам МИП позволили внести изменения в учебный план: модернизировать лабораторные практикумы существующих дисциплин бакалавриата, ввести актуальные дисциплины бакалавриата и магистратуры. В бакалавриате появилось «Цифровое прототипирование», содержанием которого является программирование в

среде VLISP, 3D-моделирование деталей и параметрических сборок, проектирование NC обработки в CAD/CAM-системе.

В ходе развития магистерской программы поколения 3+ предложены новые дисциплины, такие как «Быстрое прототипирование», «Компьютерно-графическое проектирование литьевой оснастки», «MES-технологии», «Прочностные расчеты МКЭ», для реализации которых были привлечены внешние преподаватели из промышленности, большинство из которых – наши выпускники: два кандидата технических наук, инженеры, магистры.

Важным методическим ресурсом стало содержание кафедральной веб-страницы <http://tms.ystu.ru>. Благодаря ее методическому наполнению удалось разрешить вопросы о наличии актуальных материалов УМК.

В нынешнем, юбилейном для кафедры 2022 г. тезисы студентов кафедры в очередной раз включены в сборник международной молодежной НТ конференции «Гагаринские чтения» МАИ; подана работа на областной конкурс НИРС.

Подводя итоги полувековой работы нескольких поколений ППС кафедры, можно с уверенностью сказать, что выпускники кафедры КИ ТМС могут и должны возглавить реинжиниринг отечественных предприятий в соответствии с национальными интересами России в XXI в.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К открытию центра CAD/CAMи специализации «Компьютерно-интегрированное машиностроение» на кафедре технологии машиностроения ЯГТУ: Пояснительная записка / О.Н. Калачев, Яросл. гос. техн. ун-т. Ярославль, 1997. 31 с. / Веб-страница кафедры КИ ТМС ЯГТУ. URL: [https://tms.ystu.ru/publkon/kon2\\_4a50.pdf](https://tms.ystu.ru/publkon/kon2_4a50.pdf)
2. Калачёв, О.Н. Автоматизация размерных расчетов на этапе проектирования технологического процесса механообработки / О.Н. Калачев, С.А. Погорелов // *Вестник машиностроения*. 2002. № 6. С. 54-58.
3. Калачёв, О.Н. Компьютерно-интегрированное машиностроение и CAD/CAM Cimatron // *Информационные технологии*. 1998. № 10. С. 43-47, 49.
4. Калачев, О.Н. Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk / О.Н. Калачев, О.А. Екимов // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2016. №. 4. С.3-7.
5. Укрошение строптивного работа. Видео фрагмент. URL: <https://youtu.be/6G9hxMH0Eig>.

## ОБУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГРАФИКИ

**В.И. Сафонов**

Мордовский государственный педагогический университет  
им. М.Е. Евсевьева

*Рассматривается востребованность языка программирования Python для построения трехмерных объектов. В качестве основы для изучения данного языка предлагается использование среды трехмерного моделирования Blender.*

***Ключевые слова:** технология программирования, трехмерная графика, обучение.*

## TRAINING IN 3D GRAPHICS PROGRAMMING TECHNOLOGY

**V.I. Safonov**

M.E. Evseviev Mordovian State Pedagogical University

*The demand for the Python programming language for building three-dimensional objects is being considered. As a basis for learning this language, we offer the use of the Blender 3D modeling environment.*

***Keywords:** programming technology, 3D graphics, training.*

3D-моделирование – создание, манипуляция и хранение геометрических объектов, окружающих нас или воображаемых. 3D-моделью является математическое представление любого трехмерного объекта (реального или предполагаемого) в 3D-окружающей среде программного обеспечения. Процесс создания требует специализированного программного обеспечения и знания компьютерного кодирования.

В настоящее время рост интереса к визуализации привел к тому, что производители программных средств 3D-анимации создают более совершенные и адаптированные приложения. Выбор программы для изучения трехмерной графики зависит от итоговых целей, так как каждый 3D-редактор имеет свои особенности и направленность.

Исходя из проведенного нами анализа, можно сделать вывод, что среди бесплатного программного обеспечения существует достаточно много качественных 3D-редакторов, отвечающих различным запросам

пользователей. В зависимости от того, на что именно направлено изучение трехмерной графики, будь то дизайн интерьера или создание моделей для компьютерных игр, выбор падет на конкретное программное обеспечение. Однако, если говорить о наиболее универсальном редакторе, который позволит не только изучить основы 3D-графики, но и даст возможность выполнять более сложные задачи, то это определенно будет Blender. Данный 3D-пакет идеально подходит для изучения трехмерной графики ввиду своего широкого функционала, схожего с платными программами, и при этом абсолютной доступности. Однако, редко рассматривается возможность изучения более высокого уровня 3D-моделирования – программирования 3D-графики. Следует создать рекомендации по обучению основам программирования на языке программирования Python для создания скриптов в Blender, а также разработать рекомендации по обучению созданию трехмерных объектов в Blender с использованием языка программирования Python [1-2].

Blender имеет немало полезных опций и возможностей [3-4]. В Blender используется язык программирования Python. Данный язык программирования позволяет расширить возможности пользователя при работе в приложении, а также оптимизировать многие процессы.

В Blender встроен свой интерпретатор Python версии 3.x, который запускается вместе с Blender и остаётся активным. Данный интерпретатор необходим для запуска скриптов отрисовки пользовательского интерфейса, а также используется для некоторых встроенных в Blender инструментов. Интерпретатор почти ничем не отличается от обычной Python-среды. Обучение тому, как создавать Python-скрипты, можно выполнять в Blender. Встроенному интерпретатору Blender предоставляет модуль `bpy`. Этот модуль должен быть импортирован в тело скрипта, что после даст доступ к данным приложения, классам и функциям.

Blender Python API предоставляет следующие возможности:

- редактировать любые данные, доступные через пользовательский интерфейс (сцены, меши, частицы и т.д.);
- изменять предпочтения пользователя, горячие клавиши и темы пользовательского интерфейса;
- запускать инструменты с нужными настройками;
- создавать элементы пользовательского интерфейса такие как меню, заголовки и панели;
- создавать интерактивные инструменты;
- рисовать вспомогательную графику используя команды OpenGL из скриптов Python.

Для реализации команд на Python используется интерпретатор, встроенный в редактор Blender. Python – это скриптовый язык или язык

сценариев. В этом качестве он применяется для автоматизации выполнения различных задач во многих программах, например, в таких редакторах трехмерной графики, как GIMP, Blender, Cinema 4D, Maya, Inkscape и Scribus. Python занял свою нишу в игровой индустрии: он используется в играх Eve Online, Civilization IV и Battlefield 2.

Python является строго типизированным языком, но в то же время не требующим явного объявления переменных. Также, данный язык программирования чувствителен к регистру – переменная `var` не эквивалентна переменной `Var` или `VAR`, и по итогу это будут три разные переменные. Кроме того, Python является языком объектно-ориентированного программирования.

Применение интерпретатора Python для создания трехмерных объектов в редакторе Blender помогает развивать алгоритмическое мышление, а наглядное представление результатов работы кода в виде графики способствует мотивации изучения программирования. Также, это позволяет продемонстрировать применение программирования в профессиональной деятельности, в данном случае, в 3D-моделировании. Кроме того, пользователям, уже имеющим представления о работе в трехмерных редакторах, изучение Blender Python API позволит взглянуть на 3D-моделирование с другой стороны.

Предметом изучения являются принципы и методы создания трехмерных объектов в Blender с использованием языка программирования Python. Целесообразность изучения языка Python определяется стремительным развитием 3D-моделирования как профессиональной деятельности и все большим внедрением трехмерной графики в повседневную жизнь. Пользователи получают навыки программирования и 3D-моделирования, которые повысят их подготовленность к освоению профессий, связанных с технологией трехмерного моделирования и организовать практическое овладение ими данной технологией для решения задач трехмерного моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гэддис, Т.* Начинаем программировать на Python. СПб.: БХВ-Петербург, 2019. 768 с.
2. *Мэттиз, Э.* Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения. СПб.: Питер, 2020. 512 с.
3. *Прахов, А.А.* Blender. 3D-моделирование и анимация. Руководство для начинающих. М.: БХВ-Петербург, 2009. 266 с.
4. *Серова, М.* Учебник-самоучитель по графическому редактору Blender 3D. Моделирование и дизайн. М.: Солон-пресс, 2020. 272 с.

## **РАЗВИТИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ТМС И ВКР В КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

**О.Н. Калачев**

Ярославский государственный технический университет

*Рассмотрены новые элементы содержания курсового проектирования по технологии машиностроения и ВКР, поддерживающие единое информационное пространство технологических решений и расчетов на основе применения различных САПР и компьютерных программ.*

**Ключевые слова:** *курсовой проект по ТМС; ВКР; БТП; САД/САМ; операционный эскиз; инструментальная наладка; размерная структура ТП; Вертикаль*

## **DEVELOPMENT OF COURSE DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGY AND GRADUATION QUALI- FICATION WORK FOR COMPUTER-INTEGRATED MECHANICAL ENGINEERING**

**O.N. Kalachev**

Yaroslavl State Technical University

*New elements of the content of course design on mechanical engineering technology and WRC are considered, creating a single information system of technological solutions and calculations through the use of various CAD and computer programs.*

**Keywords:** *course project on TMS; GQW; BTP; CAD/CAM; in-instrumental adjustment; dimensional structure of TP; Vertical*

Переход кафедры компьютерно-интегрированного машиностроения (КИТМС) ЯГТУ на обучение по профилю «Компьютерно-интегрированное машиностроение» направления 15.03.05 отразился на курсовом проектировании по технологии машиностроения (ТМС) и выпускных квалификационных работах (ВКР). В работах [1, 2] представлены этапы изменения требований к структуре и содержанию этих дисциплин учебного плана. Перечислим те новые элементы, которые были предложены в последующие годы и которые в наибольшей степени соот-

ветствуют требованиям времени по цифровизации конструкторско-технологической подготовки производства.

К ним относятся:

- гипертекстовое содержание записки;
- цифровизация представления БТП;
- сквозное проектирование маршрута обработки поверхности;
- ссылочная связь решений и расчетов с полями ОК;
- анализ размерной структуры ТП и автоматизация расчета технологических размеров;
- введение плаката инструментальной наладки;
- создание цифровой модели детали для получения в CAD/CAM-системе УП для станка с ЧПУ;
- e-технологическая документация как продукт компьютерно-интегрированного проектирования.

В доцифровую эпоху традиционный результат курсового проектирования по ТМС и ВКР – это текстовая записка и так называемая «графическая часть» с бумажными плакатами формата А1 [1]. При этом в самой записке отсутствовали чертежи, базовый ТП, операционные эскизы, что выносилось в содержание «графической части». В цифровой среде современной технологии машиностроения подобное разделение информации выглядит устаревшим, поэтому появилось требование – оформление записки в виде «гипертекста» – комбинация текста с графическими иллюстрациями чертежей, операционных эскизов, проекций 3D-моделей, которые дают полное представление о проектной работе студента.

Новым элементом КП и ВКР стало представление базового технологического процесса (БТП) в виде таблицы Word, объединяющей всю заводскую технологическую документацию (МК, ОК и КЭ) в сжатом, обозримом виде. Теперь студенту не надо ссылаться на многостраничные фото или ксерокопии документации, полученной во время практики. Вся информация по операциям, переходам, ОЭ, инструменту, базированию и по технологическим размерам доступна для анализа целесообразности технологических решений в БТП и возможных «узких мест», связанных с базированием, применяемым инструментом и оборудованием.

Следующее новое требование – сквозные расчеты по выбранным поверхностям детали. Это означает, что сначала намечается маршрут обработки поверхности, а затем на эту поверхность рассчитываются припуски и технологические размеры, а далее – режимы резания и нормы времени на каждый переход намеченного маршрута. При этом становится логически ясной вся цепочка решений и расчетов, связанная с конкретной поверхностью: назначенные припуски определяют глубину резания на каждом переходе (методе обработки), режимы рассчитываются с ис-

пользованием этой глубины и ранее полученного технологического размера.

В традиционных методических материалах [1] после принятия решений и расчетов не требовалось указывать то поле ОК или МК, где они отображаются. В итоге многие расчеты по факту делались формально, «повисали в воздухе», их действительное использование в техдокументации было сложно подтвердить. Новым орг. элементом стало требование после принятия каждого решения и завершения расчета обязательно указать номер операции, номер листа и строки ОК. Технологическая документация стала действительно главным результатом технологического проектирования и включается подразделом в технологический раздел записки. Развитая система закладок и гиперссылок Word позволяет легко выявить конечную цель выполненных расчетов или решений студента.

Важным элементом технологического проектирования является рациональный выбор размерной структуры ТП, исключающий появление погрешности базирования при отступлении от принципа единства баз. Имеющаяся литература показывает, какие трудоемкие ручные расчеты при этом необходимы. У нас этот перебор вариантов структуры ТП выполняется компьютерным анализом с использованием программы KON7 [3], разработанной на основе графового подхода к описанию модели ТП. Программа автоматически выявляет размерные цепи и оценивает возможность достижения заданной точности конструкторских размеров варианта ТП (рис. 1).

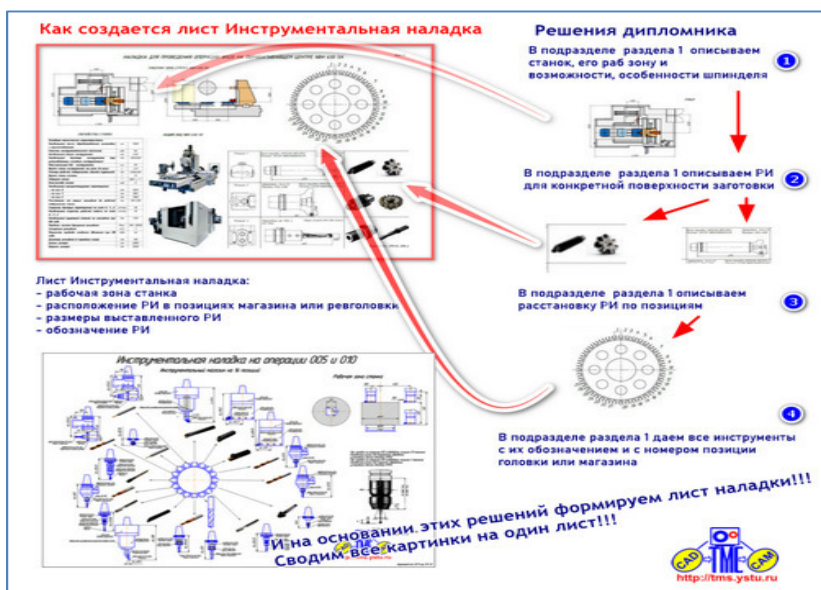


**Рис. 1. Размерная структура варианта ТП**

С давних пор главным графическим результатом КП по ТМС и ВКР являлся плакат формата А1 «Операционные эскизы», на который выносятся



наиболее сложные технологические переходы проектируемого ТП. Согласно ЕСТД, на них предписывается показывать обработанную поверхность, размеры, которые надо получить в результате обработки, схему базирования, упрощенный режущий инструмент и режимы резания[4]. Такой плакат декларирует ЧТО надо получить после обработки, но не показывает, КАК реализуются ОЭ, каковы функциональные возможности выбранного станочного оборудования, не рассматривает размерную наладку инструмента, дополнительные ее элементы, связанные с размещением инструмента в позициях револьверной головки или магазина станка. Последние годы всю эту информацию студенты должны представить на отдельном плакате «Инструментальная наладка», который показывает, как достигается выполнение размеров, указанных на ОЭ технологического процесса (рис. 2).



**Рис. 2. Формирование плаката инструментальной наладки**

Обязательным элементом технологического проектирования является теперь построение 3D-модели детали для проектирования УП в CAD/CAM-системе [5]. В КП по ТМС ограничиваемся одной поверхностью, в ВКР – моделируется обработка сочетаний поверхностей. Далее студент поясняет УП путем сопоставления кадров с узловыми точками спроектированной траектории РИ. В дальнейшем на этапе ВКР предпола-

гается анализировать различные стратегии обработки на станке с ЧПУ и выбирать оптимальную по критерию минимизации времени обработки с сохранением требуемых параметров точности и шероховатости.

Таким образом, компьютерная интеграция в ходе курсового проектирования по ТМС и в ВКР обеспечивается файлом записки, содержащем разнородную информацию (текстовую, формульную, графическую) проектных решений, которая далее переносится студентом в дерево, создаваемое в САПР ТП Вертикаль, а затем автоматически распределяется по полям шаблонов МК, ОК и КЭ, генерируя технологическую документацию спроектированного студентом ТП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учеб. пособие / О.Н. Калачев, Ю.А. Легенкин, В.Т. Сеницын, Яросл. гос. техн. ун-т. -Ярославль, 2010. 45 с. / Веб-страница кафедры КИ ТМС ЯГТУ. URL: <https://tms.ystu.ru/mu=230510.pdf>
2. Примерная структура ВКР / Веб-страница кафедры КИ ТМС ЯГТУ. URL: [https://tms.ystu.ru/sostav\\_VKR\\_2015.pdf](https://tms.ystu.ru/sostav_VKR_2015.pdf)
3. Калачев, О.Н. Графическое моделирование размерной структуры технологического процесса на электронном чертеже в среде AutoCAD / О.Н. Калачев, Н.В. Богоявленский, С.А. Погорелов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2012. №. 5. С.13-19.
4. Схема создания содержания инструментальной наладки. / Веб-страница кафедры КИ ТМС ЯГТУ. URL: [https://tms.ystu.ru/KON=2021-05-26\\_063752=500.png](https://tms.ystu.ru/KON=2021-05-26_063752=500.png)
5. Цифровое прототипирование. Моделирование в CAD/CAM Cimatron механообработки на фрезерном станке с ЧПУ / Сост. О.Н. Калачев. – Ярославль: Изд. дом ЯГТУ, 2016. 38 с.

## РОБОТИЗИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ

**М.В. Чугунов, И.Н. Полунина, И.А. Ермишов,  
А.А. Коткин**

Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева

*Рассматривается роботизированная мобильная платформа как объект проектной деятельности студентов технического вуза. Концепция проекта основана на принципах системного инжиниринга и проектного подхода к обучению, предусматривающего формирование индивидуальных образовательных траекторий. Разработана интегрированная модель роботизированной мобильной платформы, обеспечивающая реализацию проектного обучения.*

**Ключевые слова:** Мобильная роботизированная платформа, проектное обучение, системный инжиниринг, натурная (физическая) модель, виртуальная модель, интегрированная модель, САХ-технологии.

## MOBILE ROBOTIC FRAMEWORK AS THE OBJECT OF PROJECT BASED LEARNING

**M.V. Chugunov, I.N. Polunina, I.A. Ermishov, A.A. Kotkin**

Ogarev Mordovia State University

*A robotic mobile framework is considered as the object of project activities of students of a technical university. The project concept is based on the principles of system engineering and a design approach to training, providing for the formation of individual educational trajectories. An integrated model of a robotic mobile framework has been developed, providing the implementation of project training.*

**Keywords:** Mobile robotic platform, project based learning, system engineering, physical model, virtual model, integrated model, CAX technologies.

В рамках деятельности НОЦ «Инженерия будущего»[1] с участием Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева разрабатывается транспортно-технологическая роботизированная платформа с функцией автономного передвижения по заданной траектории и мониторинга объектов растительного происхождения. Эта задача решается в контексте более общей задачи по разработке интеллектуальной кибер-

физической системы управления с/х предприятиями точного земледелия на основе «цифрового двойника» растений [2].

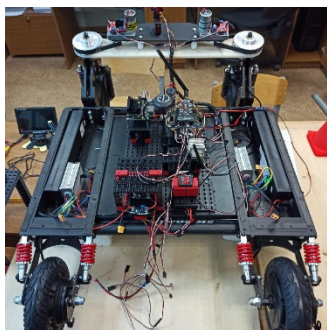
В этой связи к транспортной роботизированной платформе предъявляются особые требования, в частности, сама мобильная платформа должна представлять собой кибер-физическую систему [3], что обеспечит наилучшие возможности её интеграции с другими компонентами базовой системы управления.

Так, в частности, перед нами была поставлена задача по разработке интегрированной модели мобильной роботизированной платформы, пригодной для решения задач траекторного управления и путевой стабилизации колесного робота [4].

Интегрированная модель включает в себя две составляющие: виртуальную и натурную (физическую). Виртуальная модель представляет собой интегрированную САХ –модель, позволяющую выполнять анализ состояния и поведения мобильного робота на различных этапах его жизненного цикла в терминах механики, электроники, автоматического управления, технологий, менеджмента и многих других дисциплин.

Рассматриваемая задача является весьма сложной, многодисциплинарной и междисциплинарной, что является веским основанием для выбора её в качестве базовой задачи при реализации проектного подхода.

На рис. 1 показана концепция проекта в его натурной и виртуальной части.



*а*



*б*

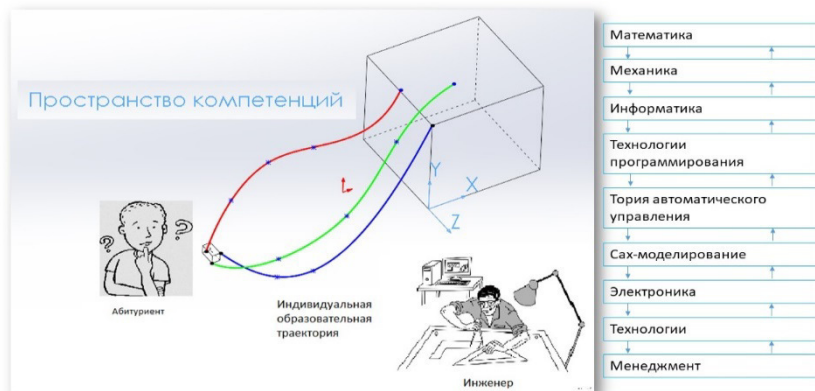
**Рис. 1. Натурная (а) и виртуальная (б) модель мобильного робота**

Виртуальная модель является параметрической и легко масштабируется. Для натурной модели выбран масштаб 1:3, что обеспечивает возможности решения исследовательских задач в постановке, наиболее приближенной к реальным условиям и, кроме того, допускает применение

модели для решения простейших технологических задач, связанных, например, с мониторингом состояния агроценоза, или промышленных технологических сред. Кроме того, интегрированная модель включает в себя единую систему управления движением как виртуальной, так и натурной модели. Особенностью этой системы является то, что алгоритмы управления используют два потока данных с систем очувствления робота, т.е. с виртуальных и физических датчиков независимо друг от друга, что существенно повышает адекватность «принимаемых» роботом решений, связанных с различного рода нештатными ситуациями.

В части постановки задачи на проектирование для студентов следует отметить следующее. С одной стороны, междисциплинарность задачи предусматривает углубленную специализацию и формирование индивидуальных образовательных траекторий; с другой стороны – делает актуальным использование принципов системного инжиниринга, что, в свою очередь, обусловлено необходимостью осознания студентами конечной цели и результатов проекта в целом, видение и понимание междисциплинарных взаимосвязей частных задач друг с другом.

На рис.2 показано трехмерное сечение гиперпространства компетенций, связанных с профессиональной подготовкой инженера и теми учебными дисциплинами, которые имеют непосредственное отношение к решаемой нами задачи.



**Рис. 2. Индивидуальные образовательные траектории студентов в пространстве компетенция**

Положение абитуриентов характеризуется некими начальными точками в этом гиперпространстве и связанным с ними гиперпараллелепипедом весьма малого объема. В процессе обучения этот параллелепипед постепенно увеличивается в объеме и, в конечном счете, занимает в

этом пространстве некоторую целевую область.

Однако положение каждого выпускника вуза в конечной точке, соответствующее в целом всем квалификационным требованиям, является уникальным и траектории их движения от начальной к конечной точке также различны. Форма этих траекторий в рассматриваемом пространстве связана прежде всего с различными индивидуальными особенностями, наклонностями и интересами студентов, которые в конечном счете определяют их специализацию.

Так, например, при реализации данного проекта проявили себя следующие предметные области для специализации студентов третьего и второго курсов: - 3D-моделирование (конструирование, проектирование и анализ проектных решений), решение задач прочности и жесткости в статике и динамике, а также оптимизация несущей системы робота, анализ кинематических и динамических характеристик робота.

Авторы выражают признательность Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям), оказавшему поддержку проекту по программе УМНИК (Победитель конкурса – И.А. Ермишов), а также руководству и модераторам НОЦ «Инженерия будущего».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НОЦ «Инженерия будущего» Официальный сайт. URL: <https://nocsamara.ru/>
2. *Gorodetsky Vladimir & Skobelev Petr.* System engineering view on multi-agent technology for industrial applications: barriers and prospects// *Cybernetics and Physics*. 2020. V. 9. № 1. P. 13-30. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35470/2226-4116-2020-9-1-13-30>
3. *Gonzalez-de-Santos P., Fernández R., Sepúlveda, D., Navas E., Emmi L., Armada M.* Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry// *Agronomy*. 2020. V. 9. № 1. P. 1638. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>
4. *Чугунов, М.В.* Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы / М.В. Чугунов, И.Н. Полунина, А.Г. Дивин, А.А. Генералова, А.А. Никулин, Д.С. Бычков // *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31. № 4. С. 609–646. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.609-646>

## ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ

**О.Н. Калачев, Д.А. Калачева**

Ярославский государственный технический университет

*Рассмотрено построение линейного графа для отображения структуры размерных связей обрабатываемых поверхностей заготовки на основе обмена данными программы KON7 и приложением GrafKON для AutoCAD на языке LISP.*

**Ключевые слова:** размерная схема; механообработка; KON7; LISP; AutoCAD; GrafKON

## GRAPHICAL DIMENSIONAL MODELING PROCESS STRUCTURES MACHINING

**O.N. Kalachev, D.A. Kalacheva**

Yaroslavl State Technical University

*The construction of a linear graph for displaying the structure of dimensional relationships of the processed workpiece surfaces based on the data exchange of the KON7 program and the GrafKON application for AutoCAD in the LISP language is considered.*

**Keywords:** dimensional chart; machining; KON7; LISP; AutoCAD; GrafKON

Известны различные модели размерной структуры технологического процесса (ТП) механообработки [1]. Рассмотрим алгоритм автоматического построения графической модели ТП в среде AutoCAD в виде линейного графа, реализованной программой GrafKON [2] на языке LISP, блок-схемы двух функций которой grafkon и spl показаны на рис. 1, 2.

Функция grafkon.

Блок 1. Главной функцией выполняются настройки системы AutoCAD: отключается «эх» (режим вывода команд в командную строку); определяется формат зоны изображения, отключаются объектные привязки, определяется режим отрисовки сетки, выводится название программы.

Блок 2. Ввод имени файла с расширением .isx, для которого строится граф.

Блок 3. Открывается файл для чтения.

Блок 4. Начинается цикл для поиска «текста пользователя» в первых одиннадцати строках файла.

Блок 5. 3-я строка найдена.

Блок 6. В 3-й строке выделяется «текст пользователя» и выводится на печать.

Блок 7. Считывается 12-я строка файла для последующего выделения информации в блоке 10.

Блок 8. Обнуление счетчиков 3-х видов звеньев для печати их индексов на сплайнах

Блок 9. Проверка достижения конца файла.

Блок 10. Выделение из строки границ 3-х видов звеньев, кода метода получения составляющих звеньев, максимального значения конструкторского размера.

Блок 11. Проверка условия: конструкторский размер или припуск?

Блок 12. Отрисовка конструкторского размера – формирование параметров для функции spl.

Блок 13. Отрисовка сплайна по 3-м точкам, простановка индекса размера.

Блок 14. Подготовка параметров для отрисовки припуска.

Блок 15. Отрисовка сплайна по 3-м точкам, простановка индекса размера.

Блок 16. Подготовка параметров отрисовки технологического размера: заготовка или механообработка.

Блок 17. Отрисовка сплайна по 3-м точкам, простановка индекса размера.

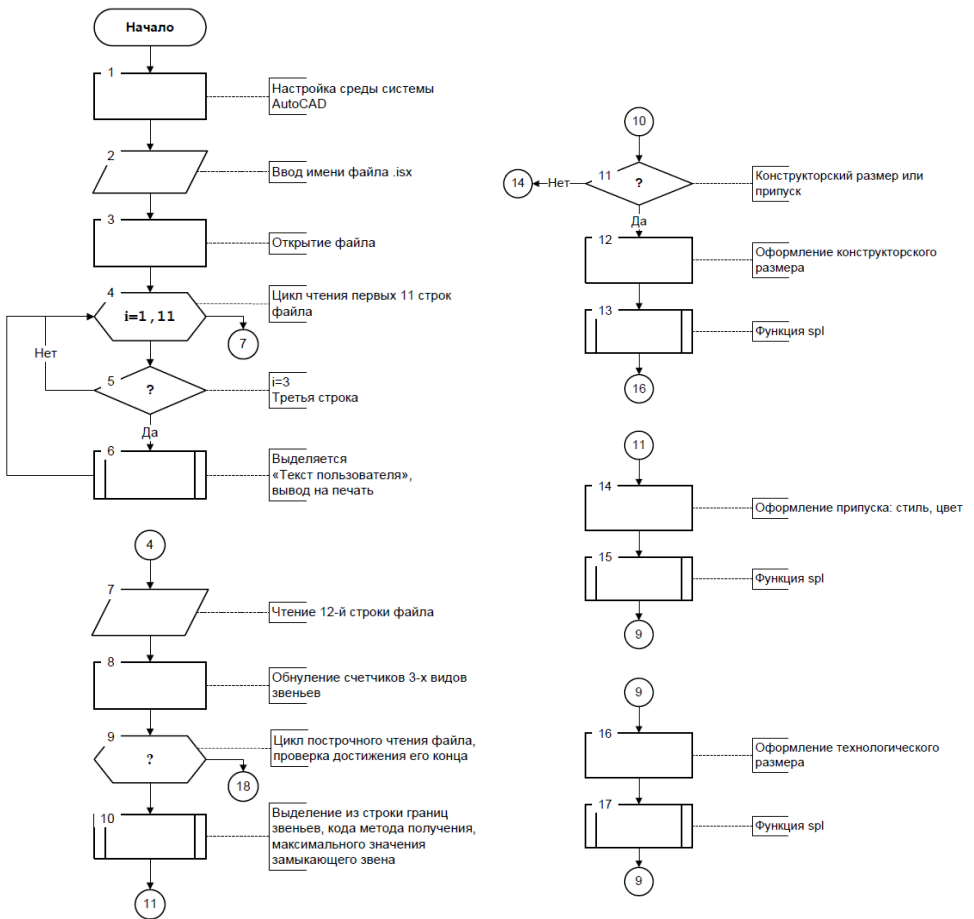
Функция spl

Блок 1. Чтение границ звеньев размерных цепей из функции grafkon.

Блок 2. Вычисление точек начальной и конечной вершин, средней точки сплайна; отрисовка сплайна – ребра графа, простановка номера звена.

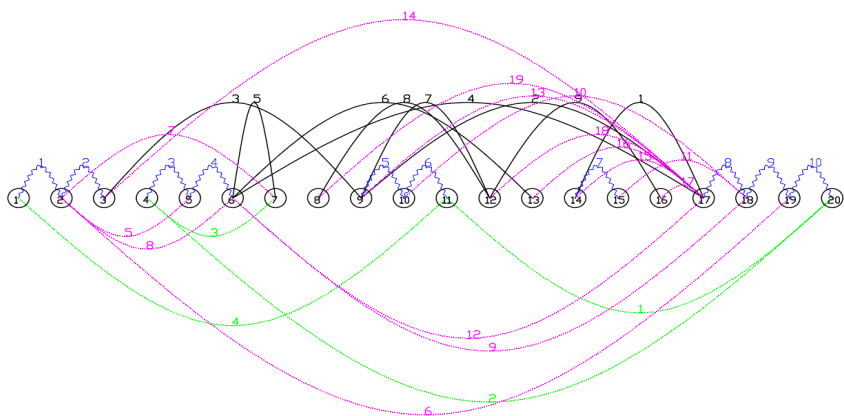
Далее следует выход из функции spl.





**Рис. 1. Фрагмент алгоритма функции grafkon**

Программное построение графа обеспечивают исходные данные, формируемые программой KON7 старших версий или программой KON7плюс[3-5]. Файл данных образован зоной общей информации и зоной замыкающих и составляющих звеньев размерной схемы из файла isxпрограммы KON7.



**Рис. 2. Линейный граф, построенный программой GrafKON**

Линейный граф (рис. 2) отображает пространственное положение поверхностей (детали) заготовки, показывает, в какой последовательности удаляются припуски при механообработке. В результате становится возможным качественный анализ вариантов ТП до выполнения многочисленных итерационных расчетов размерного анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Масягин, В.Б.* Методы автоматизации размерного анализа технологических процессов в России / В.Б. Мосягин, А.В. Мухомолов, С.Б. Шаймова // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6-1. С. 44-49.
2. *Калачев, О.Н.* Свидетельство о регистрации программы "GrafKON. Построение графа размерной структуры технологического процесса механообработки" / О.Н. Калачев, Д.А. Калачева // Роспатент. 2014 г.
3. *Калачев О.Н., Калачева Д.А.* Свидетельство о регистрации программы "KON7 плюс. Анализ размерной структуры технологического процесса механообработки и расчет технологических размеров" // Роспатент. 2014 г.
4. *Калачёв, О.Н.* Интерактивное моделирование размерных изменений заготовки при проектировании технологического процесса механообработки // *Информационные технологии*. 2001. № 2. С. 10-14.
5. *Калачев, О.Н.* Программная модификация геометрии 3D-модели детали в Autodesk Inventor для построения графа изменения размеров заготовки при механообработке / О.Н. Калачев, Ю.В. Булычев // *Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 10.* Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2015. - 315 с.; Ярославль: Изд. дом ЯГТУ. 2015. Вып. 10. С. 241-246.

## ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

**Е.С. Зимакова, Р.Н. Фадеев**

Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

*В статье отмечается актуальность проблемы использования методов анализа данных для управления технологическим процессом. Рассматриваются задачи, которые необходимо решить для использования адаптивных алгоритмов машинного обучения в управлении технологическими процессами.*

**Ключевые слова:** *системы диспетчерского контроля и управления, интеллектуальная система анализа данных, машинное обучение.*

## THE PROBLEM OF PROCESS CONTROL USING DATA MINING

**E.S. Zimakova, R.N. Fadeev**

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

*The article notes the relevance of the problem of using data analysis methods for process control. The problems that must be solved for use of adaptive machine learning algorithms in process control are considered.*

**Keywords:** *supervisory control and data acquisition systems, intelligent data analysis system, machine learning.*

В настоящее время для большинства технологических процессов используются автоматизированные системы управления (АСУ ТП). На начальном этапе внедрение АСУ ТП в различных областях промышленности было направлено на автоматизацию сложных производственных процессов, когда главная роль отводилась оператору при осуществлении управления и контроля. Сейчас цель внедрения АСУ ТП это возможно более полное исключение человека и влияния «человеческого фактора» на производственные процессы. Новое направление в развитии АСУ ТП – включение элементов, способных обеспечить управление и принятие решений непосредственно применяемой системой с обеспечением контроля диспетчером [4]. Перед разработчиками встала задача интеллек-

туализации АСУ ТП. Данные (о протекании технологических процессов с учётом действий диспетчерского персонала, параметров среды, состояний агрегатов и характеристик исходного сырья и т.п) в процессе автоматизированного или автоматического контроля образуют большой массив, который включает информацию как о текущем состоянии того или иного агрегата, так и о начавшихся критических изменениях в его технических характеристиках и свойствах. Для того чтобы отследить неблагоприятные изменения в работе оборудования используют системы диспетчерского контроля и управления (SCADA). На многих предприятиях в основе таких систем лежит принцип объединения и визуализации данных из различных источников в формате доступном для проведения анализа. Анализ представленной информации остаётся за человеком. Подобный анализ не всегда позволяет учитывать многочисленные косвенные факторы и прогнозировать критическую ситуацию априори, анализ проводится с задержкой относительно режима реального времени. Поэтому актуальными становятся методы анализа данных с использованием экспертных систем, машинного обучения.

Разработчики решений для интеллектуального анализа технологических данных считают, что их внедрение способствует:

- значительному уменьшению времени простоя оборудования;
- более качественному планированию мероприятий по техническому обслуживанию;
- сокращению времени внепланового технического обслуживания;
- полноценному анализу причин отказов оборудования;
- накоплению более точной и полной информации о технологическом процессе;
- увеличению срока службы сложного технологического оборудования.

Небольшое количество решений в области индустриальной аналитики Д.А. Мурзагулов, А.В. Замятин [3] связывают со следующими обстоятельствами:

- нестационарность и быстрое изменение по времени параметров технологических процессов приводят к сложным математическим описаниям;
- данные могут иметь неоднородную структуру (вещественные значения, события, сообщения);
- уникальность каждого объекта управления, которая требует адаптивного подхода для каждого случая;
- изменения тренда технологического сигнала, ремонтные или иные регламентные процедуры могут быть причинами возникновения аномальных ситуаций.

Интеллектуальные системы анализа на основе адаптивных алгоритмов машинного обучения могут осуществлять контроль и оценку состояния сложных динамических объектов управления в условиях реального времени, формировать решения о воздействии на технологический процесс. Процесс адаптации продолжается, и система постоянно обучается, в ходе обработки данных расширяются имеющиеся знания. Объединение интеллектуальной системы с существующими на предприятии SCADA позволяет достигнуть автоматического и непрерывного функционирования управления технологическим процессом.

Использование адаптивных алгоритмов машинного обучения в управлении технологическими процессами требует решения ряда задач:

- Предварительная обработка сигналов. Сигнал является единицей технологической информации и обычно поступает от различного типа измерительных преобразователей: давления, температуры, расхода и т. п. В сигналах могут присутствовать искажения различного характера (шумы, избыточная информация, пропуски значений и т. д.). До процесса построения модели это следует устранить или снизить степень их влияния [1].

- Классификация технологических сигналов. Технологические сигналы могут быть разных типов от детерминированных до случайных. Для сигналов первого типа математический аппарат анализа будет отличаться от анализа случайных величин, где необходимо оперировать вероятностными характеристиками. Кроме этого технологические сигналы могут образовывать как отдельный класс, так и в случае более сложных процессов являться комбинацией классов. Классификация технологических сигналов сделает возможным применение своего метода анализа к каждому классу, облегчит в дальнейшем принятие решений.

- Разработка метрик оценки качества для обеспечения контролируемой точности алгоритмов и выбор модели прогнозирования. Модель прогнозирования оказывает влияние на результат работы алгоритма машинного обучения. Для оценивания пригодности модели необходимо разработать подходящие метрики качества, которые наилучшим образом позволят учесть специфику технологических процессов.

- Анализ совокупности сигналов. Многие реальные объекты характеризуется совокупностью сигналов. Для решения этой задачи могут быть применены методы поиска взаимных корреляций между независимыми параметрами и установления их степени влияния друг на друга.

- Разработка адаптивного алгоритма распознавания и прогнозирования внештатных ситуаций. Необходимо создать модели,

которые сопоставляют результаты мониторинга текущей ситуации с набором ретроспективных данных, с определённой долей вероятности предсказывают возникновение внештатной ситуации или необходимость внепланового технического обслуживания объекта. Постоянно контролируются отклонения прогнозного и фактического сигналов. Чтобы избежать ложных срабатываний в процессе установления вероятности отказа оборудования и внештатной ситуации, необходимо определить пороговое значение максимально возможного отклонения и длительности отклонения сигналов. Адаптивность подхода состоит в том, что учитывается класса сигнала (определён на предыдущих этапах), когда отдаётся предпочтение модели для прогнозирования внештатных ситуаций. Возможно использование процедур бустинга и бэггинга – последовательное и параллельное построение комплекса алгоритмов для итеративной оптимизации [2].

- Разработка технологии динамического обучения. Технологические процессы являются сложными объектами с изменяющимися во времени характеристиками, поэтому при эксплуатации интеллектуальной системы необходимо проводить дополнительное обучение модели.

Учитывая вышесказанное, отметим, что использование интеллектуального анализа данных является важным шагом для повышения эффективности управления технологическими процессами. При создании сервиса предсказания аварийных ситуаций на производстве придется решить целый ряд задач, так как технологические сигналы имеют сложную структуру, они включают большое количество компонент, содержат локальные особенности различной формы и временной протяженности, а также шумовые факторы различной природы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
2. Замятин, А.В. Интеллектуальный анализ данных. Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2020. 196 с.
3. Мурзагулов, Д.А. Адаптивные алгоритмы машинного обучения в управлении технологическими процессами / Д.А. Мурзагулов, А.В. Замятин // *Автоматизация. Современные технологии*. 2018. Т. 72. № 8. С. 354—361.
4. Самойлова, Е.М. Интеграция искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления и проектирования технологических процессов / Е.М. Самойлова, А.А. Игнатьев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. № 1. С. 127-132.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ВАЛОВ

Э.И. Ясюкович

Белорусско-Российский университет

*Рассматривается методика имитационного моделирования процесса обработки длинномерных валов, содержащая построенную на основе уравнений Лагранжа второго рода математическую модель, алгоритм, программное обеспечение и результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** *длинномерный вал, имитационное моделирование, масс-геометрические параметры, динамические уравнения, токарный металлообрабатывающий станок.*

## SIMULATION MODELING OF MACHINING PROCESSES OF LONG-DIMENSIONAL SHAFTS

E.I. Yasyukovich

Belarusian-Russian University

The technique of simulation modeling of the processing of long shafts is considered, which contains a mathematical model, algorithm, software and simulation results based on Lagrange equations of the second kind.

**Keywords:** *long shaft, simulation modeling, mass-geometric parameters, dynamic equations, metalworking lathe.*

Повышение эффективности механической обработки длинномерных валов, используемых в бумагоделательной промышленности и тяжелом машиностроении, требует проведения специальных расчетных исследований процессов их функционирования.

В настоящей работе для выполнения таких исследований предлагается разработанная имитационная математическая модель, описывающая процесс обработки длинномерных валов на токарном станке.

На качество, статическую и динамическую погрешности обработки длинномерных валов существенное влияние оказывают технические характеристики шпиндельного узла, а также жесткость центров токарного станка и параметры его коробки передач [2, 3],

Исследуемая в настоящей работе система содержит асинхронный двигатель, ременную передачу привода, коробку передач, суппорт, режущий инструмент, обрабатываемую заготовку и оператора.

Для формализации процессов, возникающих в рабочих режимах исследуемой системы, представим ее в виде эквивалентной схемы, состоящей из нескольких сосредоточенных масс, объединенных упругими связями. Колебания элементов такой системы могут возникать в связи с управляющими воздействиями оператора или из-за неоднородности структуры материала обрабатываемой заготовки.

Расчетная схема изучаемой технологической системы, разработанная с учетом продольной и поперечной подач, упругости элементов трансмиссии станка, суппорта, торцовых креплений обрабатываемой заготовки, режущего инструмента, а также действия оператора, представлена на рисунке 1.

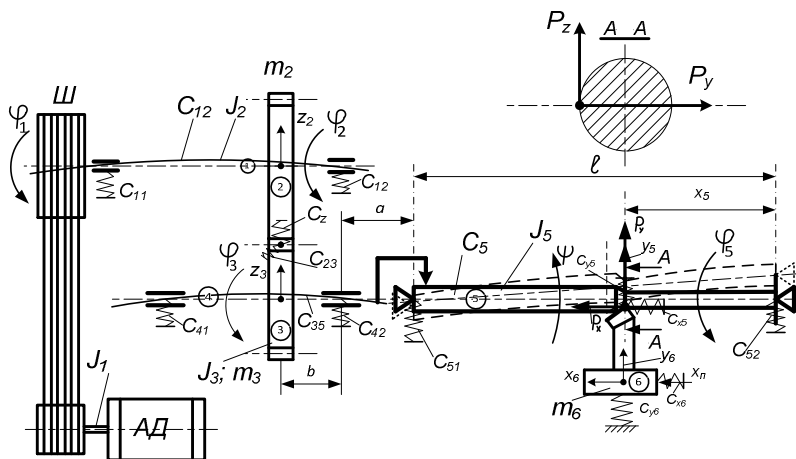


Рис. 1. Динамическая схема технологической системы обработки длинномерных валов

На приведенном рисунке приняты следующие обозначения:

АД – асинхронный электродвигатель; 1 – элементы трансмиссии станка; 2, 3 – ведущая и ведомая шестерни привода обрабатываемой заготовки; 4 – вал привода заготовки (шпиндель станка); 5 – обрабатываемая заготовка (длинномерный вал); 6 – суппорт с режущим инструментом (резцом).

В расчетной схеме (рис. 1) приняты следующие независимые (обобщенные) координаты:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_5$  – углы поворота соответственно



шкива (III), ведущей и ведомой шестерен привода, обрабатываемого вала в сечении, определяемом положением резца;  $z_2, z_3$  – линейные перемещения шестерен 2 и 3 в радиальном направлении;  $x_5, y_5, z_5$  – линейные перемещения точки контакта острия резца с обрабатываемой заготовкой в осевом, радиальном и вертикальном направлениях соответственно;  $x_6, y_6$  – линейные перемещения суппорта в параллельном и радиальном к оси обрабатываемой заготовки направлениях;  $\psi$  – угол поворота оси заготовки относительно нормальной к ней горизонтальной оси, проходящей через вершину резца.

Формализация процессов функционирования исследуемой системы выполнена на основе дифференциальных уравнений второго порядка, построенных по схеме Лагранжа второго рода [5].

Для проведения имитационного моделирования процессов обработки длинномерных валов было разработано программное обеспечение, некоторые результаты которого представлены на рис. 2 в виде динамических характеристик, на котором по оси ОУ отложены амплитуды колебаний обобщенных координат (А).

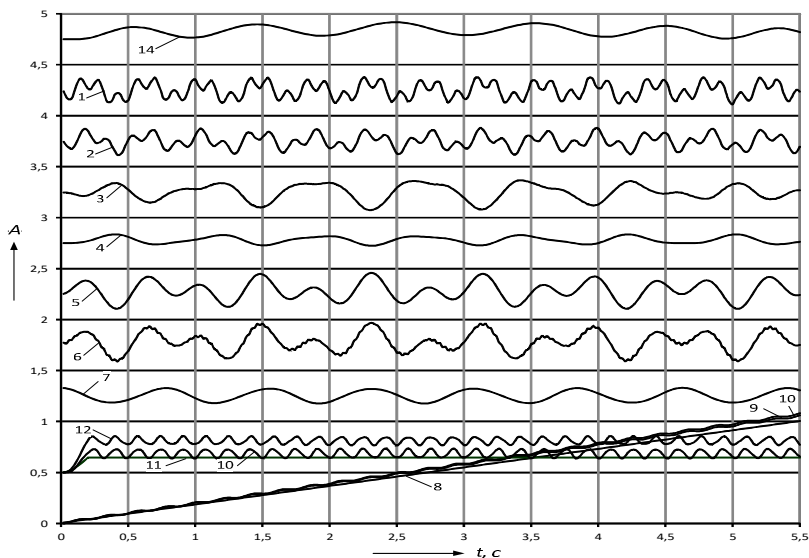


Рис. 2. Динамические характеристики технологической системы обработки длинномерных валов

То есть, по результатам решения уравнений математической модели с помощью специальной процедуры GRAF выполняется построение динамических характеристик процесса исследуемой технологической системы.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: 1 – изменение во времени координаты  $\varphi_1$ \*40, рад; 2 – координаты  $\varphi_2$ \*80, рад; 3 – координаты  $\varphi_3$ \*40, рад; 4 – координаты  $\varphi_5$ \*40, рад; 5 – координаты  $z_2$ \*200, м; 6 – координаты  $z_3$ \*1500, м; 7 – координаты  $z_5$ \*1500; м; 8 – задающий параметр перемещения суппорта по оси  $OX$ ,  $x_n$ , м; 9 – координаты  $x_5$ , м; 10 – координаты  $x_6$ , м; 11 – задающий параметр перемещения суппорта по оси  $OY$ ,  $y_n$ \*70000, м; 12 – координаты  $y_5$ \*70000, м; 13 – координаты  $y_6$ \*70000, м; 14 – координаты  $\psi$ \*1000, рад.

Кроме этого, на рисунке 2 оси  $OX$  системы координат смещены вверх по вертикальной оси: для графиков 11, 12, 13 на 0.5 единиц; для графиков 1, 2, 3, 4 – на 1.25, 1.75, 2.25, 2.75 единиц; для графиков 5, 6, 7, 14 – на 3.25, 3.75, 4.25, 4.75 единиц соответственно.

Расчетные исследования производились с шагом интегрирования по времени 0.001 с на интервале времени до 100 с и более при варьировании упругими характеристиками технологической системы и обрабатываемой заготовки.

Таким образом, в настоящей работе приведены разработанные имитационная математическая модель, программное обеспечение и некоторые результаты расчетных исследований влияния параметров и режимов работы технологической системы обработки длинномерных валов на качество обрабатываемой поверхности и устойчивость технологического процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лизогуб, В.А. Влияние проектных параметров станка и режимов резания на точность обработки // *СТИН*. 2005. №. 1. С. 17 – 19.
2. Орликов, М.Л. Динамика станков. 2-е изд. перераб. и доп. К.: Выща шк., 1989. 272 с.
3. Кирилин, Ю.В. Методика расчета виброустойчивости станка // *СТИН*. 2005. № 1. С. 3 – 6.
4. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Ерёмко, Е.Э. Фельдштейн. Минск: Выш. шк., 1990. 512 с.
5. Бурский, В.А. Технологические и теоретические основы механической обработки нежестких деталей. Минск: Белоргстанкинпроимздат, 2000. 370 с.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ ПРОТЯЖЕК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ**

**Р.А. Молчанов, А.В. Оборин**

Ярославский государственный технический университет

*Рассматриваются особенности разработанного программного обеспечения выбора и расчета параметров протяжек для обработки отверстий с оформлением отчета и чертежа для дисциплины «Режущие инструменты».*

**Ключевые слова:** обучающая программа, расчет и конструирование протяжек, чертеж протяжки.

## **THE USE OF SOFTWARE IN THE CALCULATION AND DESIGN OF BROACHES FOR HOLE PROCESSING**

**R.A. Molchanov, A.V. Oborin**

Yaroslavl State Technical University

*The features of the developed software for selecting and calculating the parameters of broaches for hole processing with the design of a report and drawing for the discipline "Cutting tools" are considered.*

**Keywords:** training program, calculation and construction of broaches, drawing of broache.

При изучении курса «Режущие инструменты» у студентов часто возникают трудности практического освоения некоторых разделов, в частности, раздела, связанного с расчетом и конструированием различных типов режущих инструментов. Это связано с высокой трудоемкостью выполнения практических заданий, отсутствием в достаточном количестве бумажных литературных источников, зачастую большой разрозненностью справочного материала, необходимостью двойной работы по оформлению бумажных черновиков и электронных отчетов и др. Указанные причины приводят к отсутствию у студентов мотивации к выполнению заданий за время практических занятий. Поэтому с целью повышения заинтересованности в выполнении заданий, снижении затрат времени на их выполнение, повышения уровня освоения компетенций было при-

нято решение о разработке программного приложения по расчету и конструированию инструментов, в частности протяжек для обработки отверстий.

При разработке приложения решались задачи: реализации методики проектирования протяжек для обработки отверстий [1], включающей последовательность выбора и расчета элементов  $M$  параметров протяжки, где на каждом шаге проектирования нужно принимать самостоятельное решение; оснащения методики всей необходимой справочной информацией; формирования электронного отчета о проведенном проектировании; автоматизации выполнения наиболее трудоемких и малосодержательных этапов; создания последовательности разработки чертежа протяжки по отдельным его составляющим (таблица размеров, главный вид, поперечные и продольные сечения зубьев, технические требования и др.) с использованием информации, полученной в результате расчета; автоматизации выполнения наиболее трудоемких этапов разработки конструкторской документации.

Приложение разрабатывалось в среде программирования Microsoft Visual Studio 2022 (студенческая версия) с использованием технологии MFC[2].

Интерфейс приложения включает главное окно программы со стандартным выпадающим меню. При создании нового файла появляется окно представления, в которое загружается редактируемый шаблон отчета о выполнении расчета протяжки (рис. 1).

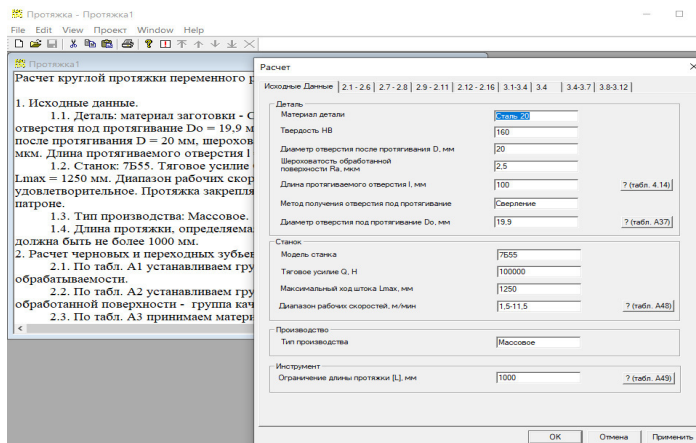
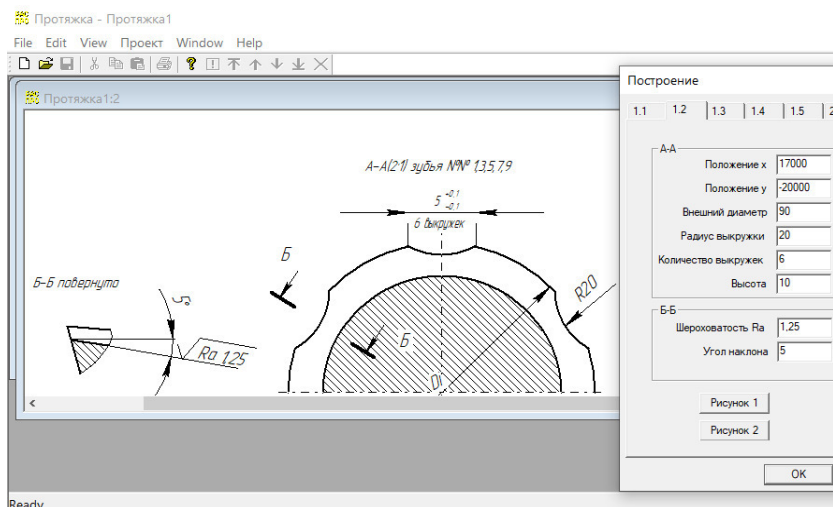


Рис. 1. Интерфейс программы с разделом расчета протяжки

Методика проектирования представлена в модальном диалоговом ресурсе с набором страниц свойств, вызываемом командой «Расчет» меню «Проект». Каждый пункт методики снабжен полями ввода информации о проектируемом объекте и сопровождается средствами вызова необходимой справочной информации.

Формулы для расчета параметров реализованы в виде набора полей ввода значений переменных и получаемого результата, отражающих структуру формулы. Применение введенной и полученной информации обеспечивает ее встраивание в шаблон отчета.

Также в приложении реализованы средства разработки чертежа протяжки [3], с использованием технических условий [4]. Средства разработки вызываются командой «Чертеж» меню «Проект» и включают окно представления с шаблоном чертежа протяжки, а также модальный диалоговый ресурс с набором страниц свойств (рис. 2).



**Рис. 2. Интерфейс программы с разделом разработки чертежа протяжки**

В диалоговом ресурсе представлена последовательность разработки чертежа протяжки, включающая элементы управления каждого элемента чертежа. Каждый пункт последовательности содержит необходимые для разработки чертежа справочные данные. В процессе управления параметрическими элементами чертежа можно задавать необходимые значения конструктивных параметров из результатов расчета, проставлять размеры, шероховатость поверхности, вводить текст и др.

Разработанная программа не требует установки, полностью автономна, проста в использовании и не требует обучения работе с ней.

Использование рассмотренных средств автоматизации расчета и конструирования инструмента способствует более полному освоению компетенций по дисциплине «Режущие инструменты», в том числе в области использования цифровых технологий машиностроения, могут быть использованы при выполнении практических работ, а также могут быть полезны работникам машиностроительных предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маргулис, Д.К.* Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
2. *Круглински, Д.* Программирование на MicrosoftVisualC++ для профессионалов / Д. Круглински, С. Уингоу, Дж. Шеферд. СПб: М.: Изд.-торговый дом «Русская редакция», 2004. 861 с.
3. ГОСТ 20365-74 Протяжки круглые переменного резания диаметром от 14 до 90 мм. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1976.
4. ГОСТ 28442-90 Протяжки для цилиндрических, шлицевых и гранных отверстий. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1991.

## СКВОЗНОЙ ПРОЕКТ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.А. Кулебякин, Р.А. Молчанов

Ярославский государственный технический университет

*В статье рассматриваются вопросы сквозного проектирования средств управления, моделирования обработки и создания управляющих программ мехатронных систем и робототехнологических комплексов (РТК). Также рассматриваются возможности средств управления оборудованием в выборе программного обеспечения для подготовки роботизированных технологических процессов. Вопросы совместной работы нескольких групп проектировщиков в условиях цифрового производства являются актуальными.*

**Ключевые слова:** электронная система управления, мехатронная система, технология обработки, промышленный робот, управляющая программа, виртуальная среда SprutCAM Robot v.14.

## END-TO-END PROJECT OF MANAGEMENT TOOLS ROBOTICS COMPLEXES

A.A. Kulebyakin, R.A. Molchanov

Yaroslavl State Technical University

*The article deals with the issues of end-to-end design of control tools, modeling of processing and creation of control programs of mechatronic systems and robotic technology complexes (RTK). The possibilities of equipment management tools in the selection of software for the preparation of robotic technological processes are also considered. The issues of joint work of several groups of designers in the conditions of digital production are relevant.*

**Keywords:** electronic control system, mechatronic system, processing technology, industrial robot, control program, SprutCAM Robot v.14 virtual environment.

Проекты, с которыми работает САПР P-CAD (ACCELEDA) [1] имеют разное структурное и иерархическое наполнение. Прежде всего, следует выделить два класса объектов проектирования, по которым происходит взаимодействие САПР в приборостроении с другими. Это: 2D и 3D модели электро-компонентов и печатных плат. Два класса объектов, в двух САПР дает нам несколько комбинаций форматов представления файлов, в которых хранится соответствующая информация: \*.SCH,

\*.PCB, \*.LIB \*.DXF, \*.PDF. Заметим, что в САПР P-CAD (ACCELEDA) комплектующие представляются в пяти образах элементов: базовый образ - условное графическое обозначение элемента; посадочное место элемента; 2D модель элемента; текстовое описание - формат SPICE.

Взаимодействие по обмену данными между САПР P-CAD (ACCELEDA) и другими САПР происходит с помощью нескольких интерфейсов.

В настоящее время широкое распространение получили 4 вида интерфейсов обмена данными. Это: интерфейс IGES, интерфейс STEP, группа интерфейсов DWG, DXG и группа интерфейсов IDF, IDX. Среди перечисленных видов интерфейсов обмена данными наиболее распространенным является формат STEP. Существовая и развиваясь более 20 лет, формат STEP стал в настоящее время международным стандартом по обмену данными и является базовым уровнем.

Помимо точек взаимодействия между САПР P-CAD (ACCELEDA) и другими САПР, следует различать объекты 3D визуализации. Объекты 3D, в отличие от точек взаимодействия, обладают ярко выраженным функциональным назначением с точки зрения физического принципа действия.

На рис. 1 – пример печатной платы контроллера электропривода [2].



**Рис. 1. Печатная плата контроллера электропривода**

Практически в каждом проекте контроллера присутствуют механические детали. В наиболее простых проектах контур печатной платы представляет собой пластину с длиной, шириной и высотой  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . В этом случае отсутствует необходимость использования механических САПР для проработки образа печатной платы, достаточно электрической САПР. Когда в проекте появляется печатная плата со сложным криволинейным контуром и/или множество вырезов, отверстий, пазов и т.д., применяется совместная работа P-CAD (ACCELEDA) и другой САПР, например, T-FLEX.

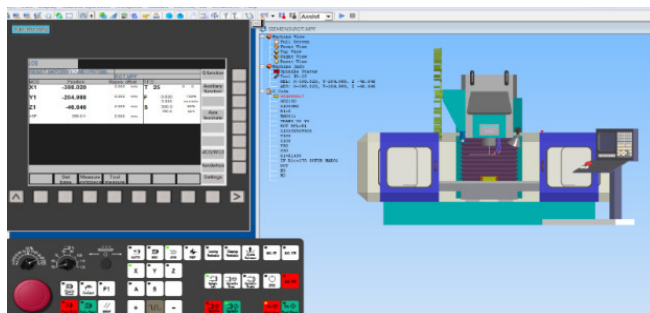
В настоящее время среди множества систем автоматизированного проектирования, используемых инженерами-конструкторами в приборостроении, заметную популярность имеет взаимодействие Altium Designer



[3] и SolidWorks. В этой паре Altium Designer – это, так называемая, электрическая САПР или ECAD для разработки топологии печатных плат и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). SolidWorks – это, так называемая, механическая САПР или MCAD, предназначенная для проектирования механических деталей, корпусов, сборочных единиц в приборостроении.

Можно выделить два подхода к внедрению 3D моделей механических деталей на печатную плату. Это создание механических деталей в среде SolidWorks с последующим экспортом, например, в Altium Designer и создание псевдо-элементов в среде Altium Designer, с последующим экспортом в SolidWorks. Помимо низкоуровневого обмена данными Altium Designer и SolidWorks в виде интерфейсов IGES, STEP, DWG, IDX, существуют более простые и удобные программные средства. По отношению к Altium Designer и SolidWorks они имеют дополнительное, подчиненное значение и трактуются как Модули или Дополнения. К наиболее известным Модулям и Дополнениям следует отнести: приложения CircuitWorks и SolidWorks PCB.

В P-CAD (ACCELEDA) создают управляющую программу, которая выполняется в программе SwanSoftCNC [4], где моделируется процесс обработки печатной платы. Интерфейс программы SwanSoftCNC представлен на рис. 2.



**Рис. 2. Интерфейс программы SwanSoftCNC**

Проектирование роботизированного технологического процесса, выполняется, например, в среде SprutCAMRobotv.14 [5]. Для расчета траектории движения инструмента и получения управляющей программы в SprutCAM необходимо задать требуемые исходные данные и параметры обработки.

Из доступных в программе роботов, выбирается 6-осевой робот Kuka KR150. С помощью инструмента «чертёж», для создания эскиза детали, во вкладке «модель» создаётся пластина, которая в дальнейшем является заготовкой.

На рис. 3 представлен интерфейс для создания управляющей программы.

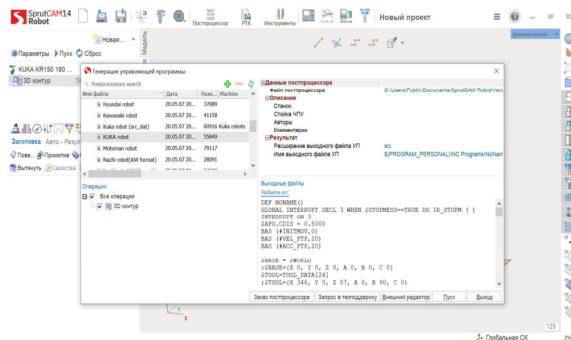


Рис. 3. Интерфейс для создания управляющей программы

В результате выполнения научно-практических работ на кафедре КИ ТМС, проведены исследования о возможности внедрения сквозных технологий в современное цифровое производство изделий машиностроения и приборостроения, с использованием перспективных средств проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разевиг, В.Д.* Система проектирования печатных плат ACCELEDA 15 (P-CAD 2000). М.: «Солон-Р», 2000. 416 с.
2. *Еришов С.А., Кулебякин А.А.* Отчет о НИР «Программируемый микроконтроллер на базе микропроцессора 80C522 для управления шаговым электроприводом» для участия в открытом конкурсе на лучшую научную работу студентов вузов по естественным, техническим и гуманитарным наукам (приказ Министерства образования РФ № 224 от 08. 08. 2005). ЯГТУ, 2005 г.
3. САПРAtiumDesigner. URL: <https://www.AltiumDesigner/Software>.
4. Программное обеспечение SwanSoftCNC. URL: <https://www.SSCNC/Software>.
5. *Молчанов, Р.А.* Проектирование обработки для фрезерного робота в среде SprutCAMRobotv.14. / Р.А. Молчанов, А.А. Кулебякин, К.И. Порсев // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2022. №. 9. С.53-57.

## СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ ЧПУ. MACH3 и NCSTUDIO

**А.А. Бычков**

Ярославский государственный технический университет

*Рассматривается работа систем управления оборудованием с ЧПУ Mach3 и NCStudio. Далее создается оптимальная тестовая траектория для сравнения работы систем управления на примере фрезерного станка «АТТ-1». Задаются одинаковые параметры скоростей и ускорений на осях станка. На основе полученных данных о времени обработки делаются выводы о исследуемых системах.*

**Ключевые слова:** ЧПУ, Mach3, NCStudio, системы управления ЧПУ, Координатограф КПА-1200, ЧПУ станок «АйТиТехмаш-1»

## CNC CONTROL SYSTEM COMPRAISONS. MACH3 and NCSTUDIO.

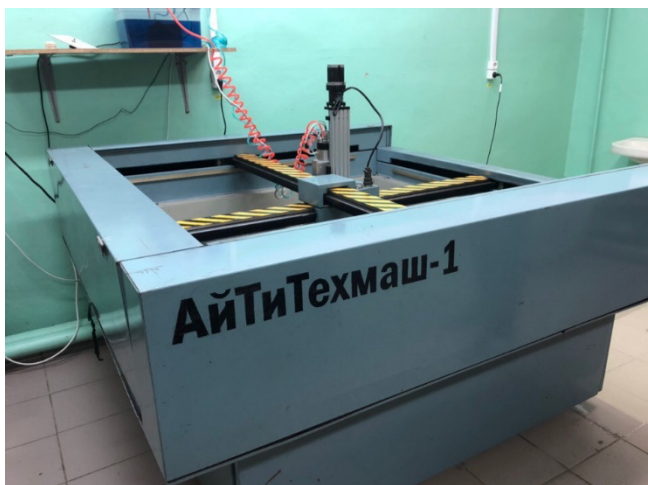
**A.A. Bychkov**

Yaroslavl State Technical University

*The specific features of the operation of CNC control systems Mach3 and NCStudio are considered. Next, a test path is created to compare the operation of the NC control system programs. The same speed and acceleration parameters are set for the purity of the comparison. On the basis of the results obtained in a practical way, conclusions are drawn for maximum efficiency in the use of software for controlling CNC equipment.*

**Keywords:** CNC, Mach3, NCStudio, CNC control systems, KPA-1200 Coordinator, CNC machine «ItTechMash-1»

На базе кафедры «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения» мной и моим коллегой Белавиным В.А. был собран и запущен в эксплуатацию фрезерный станок с ЧПУ на базе устаревшего координатографа КПА-1200. Станок был дооснащен необходимыми узлами и модулями, далее сопряжен с системой ЧПУ, сконфигурирован с ПК и, после успешных испытаний, запущен в эксплуатацию. Станку было присвоено имя «АйТиТехмаш-1» (рис. 1).

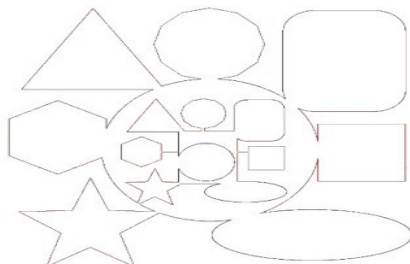


**Рис. 1. Фрезерный станок с ЧПУ «АйТиТехмаш-1»**

Так как система собиралась своими силами, то было принято решения интегрировать сразу две системы управления ЧПУ, а именно Mach3 и NCStudio. Это было сделано для того, чтобы у студентов была возможность изучить две системы на одном станке. Для достоверности их сравнения были приняты одинаковые настройки осей, а именно:

- ось X Скорость - 6000 мм/мин; Ускорение - 25 мм/сек<sup>2</sup>;
- ось Y Скорость - 6000 мм/мин; Ускорение - 25 мм/сек<sup>2</sup>;
- ось Z Скорость - 6000 мм/мин; Ускорение - 250 мм/сек<sup>2</sup>;

Была выбрана оптимальная тестовая траектория для сравнения программ (рис. 2).



**Рис. 2. Тестовая траектория**

Mach3. На сегодняшний день самая популярная программа для модельных ЧПУ из представленных на рынке.

ПО работает на ОС Windows, стоит дешевле своих аналогов и имеется возможность найти нелегализованный продукт.

Программа даёт возможность настройки под производственные нужды путем создания собственных рабочих окон и написания необходимых макросов. Также присутствует возможность различных подключения внешних контроллеров это очень удобно так как дает оператору и наладчику станка гораздо большую мобильность. Многие контроллеры данной системы поддерживают обратную связь от сервоприводов.

От аппаратного контроллера будет зависеть максимальная частота импульсов Step, например SmoothStepper позволяет использовать частоты до 4 МГц, что достаточно благоприятно для сервоприводов, и не требуется для шаговых моторов.

NCStudio. Система имеет незамысловатый интерфейс в стиле Windows 95. Эргономика управления так же выглядит устаревшей. Предположительно, это является причиной низкой популярности данного продукта.

Сосредоточим внимания на некоторых плюсах данной программы по сравнению с доступными на рынке аналогами:

Простота подключения и настройки датчика автоматического за-  
руления оси Z.

УП загружается непосредственно в буфер программы, после чего исходный файл уже не задействуется. В случае потери доступа к исходному файлу УП это не как не повлияет на обработку. Даже после отлучения электропитания и экстренного выключения оборудования система будет помнить загруженную ранее УП.

Это несомненное достоинство данной системы, особенно в том случае если файл УП передается по корпоративной сети или через облачное хранилище. Также благодаря этой функции в случае ошибки или экстренного выключения оборудования NCStudio запоминает координаты положения рабочего органа станка, что позволит продолжить обработку с места остановки после устранения всех неисправностей.

Скорость обработки тестовой траектории.

Mach3 (5:20). Mach3 хорошая программа для фрезеровки 3Дрельфевов, где допускается небольшие сглаживания траектории. Наиболее эффективно будет сочетаться с САМ системами подобных Artcam. На некоторых участках траектории снижает скорость рабочего органа что увеличивает время обработки детали.

NCStudio (3:10). Эта программа прошла тестовую траекторию значительно быстрее. По итогам теста можно утверждать, что у программы имеется более проработанный алгоритм расчета траектории.

NCStudio движется точно по заданной траектории без отклонений и скруглений углов, что может негативно сказаться на скорости обработки художественных изделий, таких как декоративные рельефы. Наиболее эффективной будет для фрезеровки точных изделий, таких как штампы и пресс формы или же изделия для раскроя различных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Форум cnc-club.ru URL: <http://www.cnc-club.ru/forum/index.php> (Дата обращения: 13.05.2022).

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ УЗЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**К.С. Ткаченко**

Севастопольский государственный университет

*В настоящей работе рассматривается обеспечение самовосстановления компьютерных узлов автоматизированных систем в машиностроении на основе аналитического моделирования. В основе подхода лежит применение систем массового обслуживания. Подход позволяет производить оценку путей самовосстановления деградирующих при нестационарных входных потоках заявок компьютерных узлов инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении, что приводит к повышению эффективности их работы.*

**Ключевые слова:** компьютерные узлы, аналитическое моделирование, машиностроение.

## **PROVISION OF SELF-REPAIR OF COMPUTER NODES OF AUTOMATED SYSTEMS IN MECHANICAL ENGINEERING BASED ON ANALYTICAL MODELING**

**K.S. Tkachenko**

Sevastopol State University

*In this paper, we consider the provision of self-repair of computer nodes of automated systems in mechanical engineering based on analytical modeling. The approach is based on the use of queuing systems. The approach makes it possible to evaluate the ways of self-healing of computer nodes of the infrastructure of automated systems in mechanical engineering that degrade with non-stationary input flows of applications, which leads to an increase in the efficiency of their work.*

**Keywords:** computer nodes, analytical modeling, mechanical engineering.

Автоматизированные системы в машиностроении позволяют реорганизовать существующее производство при использовании определенных стратегий улучшений [1]. В основе многих из этих стратегий лежит организация взаимодействий между различными структурными подразделениями промышленных предприятий. Такие стратегии наиболее часто

приводят к уменьшению затрат ресурсов и труда, исключению из бизнес-процессов несущественных действий. При этом происходит переход от классических подходов к управлению производством к горизонтальным подходам и функциональному реструктурированию. Для реструктурирования в условиях существующих предприятий требуются модели. На этих моделях отражаются реальные функции, выполняемые как автоматизированными системами, так и непосредственными исполнительскими подсистемами в рамках производственного цикла. Многие реструктуризации сводятся к классическим оптимизационным моделям и задачам, нахождение их решения возможно, например, поисковыми алгоритмами.

В частности, благодаря таким подходам становится возможным организовать работу по выпуску мелкосерийной продукции [2]. В таких условиях автоматизированные системы в машиностроении должны предусматривать функциональные возможности для учета необходимости работы при изменениях производственного уклада. Известные подходы к проектированию этих автоматизированных систем, планированию их эксплуатации, основаны на математических моделях, которые не всегда могут быть динамически изменены при различных внешних условиях. Это вызывается, в первую очередь, некачественными входными данными для построения моделей, поскольку в таких данных может встречаться большой разброс значений. Для формализации принимаемых управленческих решений эти модели упрощаются путем, в частности, укрупнения. С другой стороны, при анализе автоматизированных систем и оперативном управлении необходимы детальные описания процессов.

Поэтому в настоящей работе рассматривается обеспечение самовосстановления компьютерных узлов автоматизированных систем в машиностроении на основе аналитического моделирования. В основе подхода лежит применение систем массового обслуживания (СМО) [3–5].

Пусть компьютерный узел, входящий в состав инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении, имеет входной поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ , буфер заявок емкости  $N$ , один канал обслуживания заявок с производительностью  $\mu$ . Тогда этот компьютерный узел инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении может быть описан аналитической моделью СМО типа  $M/M/1/N$ . Для СМО  $M/M/1/N$  известны соотношения для оценки важнейших системных характеристик:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\lambda}{\mu}, \\ p_0 &= \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+2}}, \\ p_j &= p_0 \rho^j, \quad j = 1, 2, \dots, N + 1, \end{aligned} \tag{1}$$



$$p_{otk} = p_{N+1} = p_0 \rho^{N+1},$$

$$L_q = \rho^2 \frac{[1 - \rho^N (N + 1 - N\rho)]}{(1 - \rho^{N+2})(1 - \rho)},$$

$$L_s = L_q + 1 - p_0.$$

В формуле (1):  $\rho$  – загрузка СМО,  $p_0$  – вероятность простоя,  $p_j$  – вероятность пребывания в системе  $j$  заявок,  $p_{otk}$  – вероятность отказа,  $L_q$  – среднее число заявок в очереди,  $L_s$  – среднее число заявок в системе.

Для обеспечения самовосстановления компьютерного узла инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении можно оценивать количества находящихся в СМО заявок  $k$ , при котором не достигается пороговое критическое значение вероятности  $p^{krit}$ , после которого невозможны процессы самовосстановления:

$$p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_k \leq p^{krit}. \quad (2)$$

Например, по формулам (1), (2) можно рассчитать суммы вероятностей для случая загрузки  $\rho = 0,889$ , емкости буфера  $N = 389, 390, \dots, 399$ , количества заявок  $k = 59, 60, \dots, 65$ . По результатам расчетов, в свою очередь, оценивается искомое значение количества заявок  $k$  для конкретного случая. Результаты расчетов сводятся в таблицу 1:

**Таблица 1. Результаты расчетов по формулам (1) - (2)**

$N/k$	59	60	61	62	63	64	65
389	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
390	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
391	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
392	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
393	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
394	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
395	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
396	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
397	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
398	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113
399	0,998319	0,998489	0,998641	0,998779	0,998902	0,999013	0,999113

Таблицы, полученные подобно приведенной выше, рассчитанные по формулам (1), (2), могут являться частью комплекса мер обеспечения корректной работы компьютерного узла инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении на основе самовосстановления компьютерных узлов, в том числе, и для других значений узловых параметров.

Приведенный в настоящей публикации подход позволяет производить оценку путей самовосстановления деградирующих при нестационарных входных потоках заявок компьютерных узлов инфраструктуры автоматизированных систем в машиностроении. Данный подход может быть применен ко всем компьютерным узлам рассматриваемой инфраструктуры, это приведет к повышению эффективности работы инфраструктуры в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов, С.Г. Автоматизированная система технологической подготовки бережливого производства в машиностроении / С.Г. Селиванов, В.В. Никитин, М.А. Дружинина, В.Г. Шипилова // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2009. Т.13, №. 1. С. 121–127.
2. Палюх, Б.В. Повышение эффективности управления технологическими подразделениями в условиях единичного и мелкосерийного производства / Б.П. Палюх, Г.Б. Бурдо // *Advanced Engineering Research* 2009. Т. 9. №. 4. С. 659–665.
3. Ткаченко, К.С. Повышение эффективности управления качеством промышленного предприятия в условиях однородного потока заявок // *Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности. Сб. науч. трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых*. Томск, 2022. Изд-во: Томский политехнический университет. С. 209-212.
4. Ткаченко, К.С. Обеспечение гарантоспособного функционирования системы обработки данных при интервальных изменениях поточных характеристик на основе аналитического моделирования // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2021. №. 3–4(13–14). С. 25–30.
5. Ткаченко, К.С. Аналитическое узловое моделирование для контроля откликов системы мониторинга окружающей среды под воздействием деградационных событий // *Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами*. Севастополь, 2018. С. 212–213.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ  
ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАЛОВ  
МАЛОГО ДИАМЕТРА**

**М.Д. Гушчин, Д.В. Остальцева, А.С. Погодина**

Вятский государственный университет

*В статье представлены результаты исследования лазерного модифицирования поверхностных слоев на деталях тонкого сечения из стали 14X17H2, работающих в агрессивных коррозионных средах. В процессе экспериментального исследования установлено влияние технологических режимов лазерного упрочнения (скорости обработки и частоты обработки) на глубину и твердость упрочненных зон.*

***Ключевые слова:** лазерные технологии, лазерное упрочнение, вал малого диаметра, модифицирование поверхности.*

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE  
OF THE PARAMETERS OF LASER MODIFICATION MODES  
ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF SMALL DIAMETER SHAFTS**

**M.D. Gushchin, D.V. Ostaltseva, A.S. Pogudina**

Vyatka State University

*The article presents the results of a research of laser modification of surface layers on thin-section parts made of 14X17H2 steel operating in aggressive corrosive environments. During the experimental study, the influence of the technological modes of laser hardening (processing speed and processing frequency) on the depth and hardness of the modified layer was established.*

***Keywords:** laser technologies, laser hardening, small diameter shaft, surface modification.*

На производстве для закалки деталей тонкого сечения, работающих в агрессивных коррозионных средах, применяют объемную закалку. По окончании данной обработки наблюдается деформация деталей, которая является одной из причин нарушения работоспособности механиз-

ма. Это ведет к необходимости устранения дефектов деталей после упрочнения, усложнению технологического процесса изготовления валов и дополнительным затратам [1-3].

Решением проблемы деформации является лазерное упрочнение. Данная технология дает возможность избежать некоторых дефектов и изготовить детали с заданными свойствами.

Актуальной задачей становится изучение влияния технологических параметров лазерной обработки (мощности, скорости перемещения луча) и их влияния на физико-механические параметры упрочненной поверхности: глубину и твердость упрочненного слоя.

Поисковые эксперименты позволили установить основные закономерности изменения твердости поверхности и глубины закалки заготовок в процессе лазерного упрочнения вала малого диаметра. С целью определения оптимальных параметров режимов обработки были проведены исследования с постановкой планируемого эксперимента.

Лазерное упрочнение вала малого диаметра из коррозионностойкой стали 14X17H2, с исходной твердостью 206 HV, проводился на твердотельном лазере с ЧПУ TST-W200 с постоянными параметрами: силой тока 50 А, шириной импульса 9,9 мс и лазерным пятном в фокальной плоскости 0,8 мм. Для проведения металлографического анализа вала использовался прибор для микроскопических исследований - Neophot-32.

Для исследования процесса модифицирования поверхностных слоев на деталях тонкого сечения импульсным лазерным излучением проведен двухфакторный анализ. В качестве изменяемых факторов эксперимента были выбраны частота обработки  $f$ , Гц и скорость обработки  $v$ , мм/мин. Для получения математических моделей в качестве откликов системы рассматривались глубина  $h$  мм модифицированного слоя и твердость  $H$ , HV поверхности зон лазерной закалки.

Значения варьируемых факторов показаны в таблице 1. После экспериментов по стандартной методике изготавливались шлифы и производились трехкратные измерения глубины (рис. 1) и твердости закаленных зон. Обработка результатов экспериментальных проведена в программе STATISTICA [4].

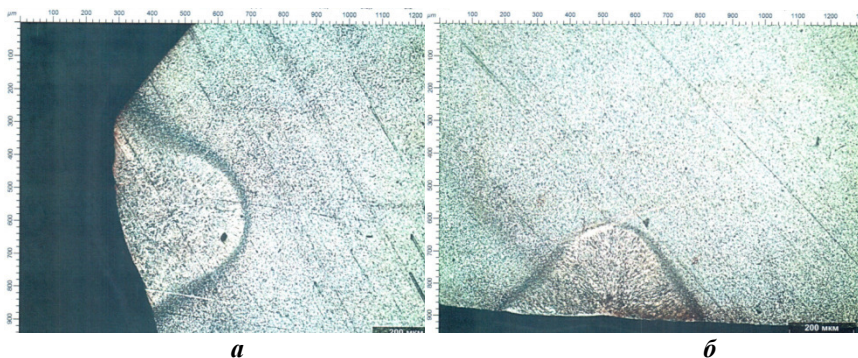
**Таблица 1. Варьируемые факторы эксперимента**

Классификация фактора	Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования	
			-1	+1
X1	Скорость обработки	$v$	60	240
X2	Частота обработки	$f$	10	35

Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

**Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований**

Входные параметры					Зависимые переменные	
№ опыта	$X_1$	$v$ , мм/мин	$X_2$	$f$ , Гц	$h$ , мм (Y1)	H,HV(Y2)
1	+	240	+	35	0,33	406
2	+	240	–	10	0,3	412
3	–	60	+	35	0,27	370
4	–	60	–	10	0,33	403



**Рис. 1. Металлографический анализ закаленных зон:**

**$a$  – минимальная глубина закалки при  $v = 60$  мм\мин,  $b$  – максимальная глубина закалки при  $v = 60$  мм\мин и  $f = 10$**

В процессе статистической обработки данных были получены уравнения регрессии. По результатам анализа математических моделей исследований построены графики зависимости глубины и твердости зон закалки от изменения скорости и частоты обработки детали. Изменение зависимых переменных от наиболее значимых факторов представлено на рисунке 2.

Глубина зон упрочнения:

$$h = 0,376000 - 0,000367v - 0,0036f - 0,00002vf,$$

где  $v$  – скорость обработки;

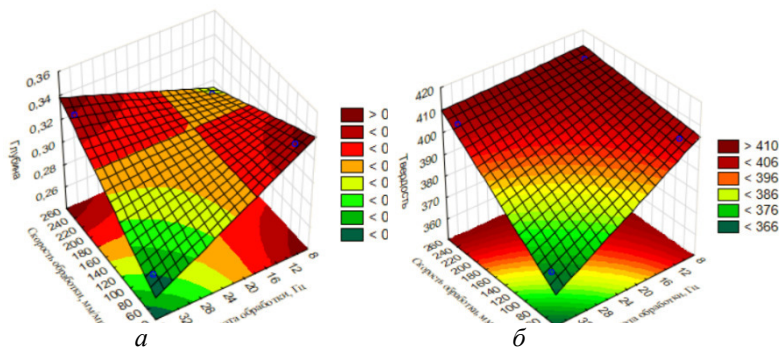
$f$  – частота обработки.

Наиболее значимым фактором, определяющим глубину зоны упрочнения  $h$ , является совокупность факторов скорость обработки и частота обработки  $vf$  (характеризует около 82 % изменчивости зависимой переменной). Менее значимые факторы – частота обработки  $f$  и скорость обработки  $v$ .

Твердость зон упрочнения:

$$H=416,8-0,01v-1,68f+0,006vf.$$

Наиболее значимым является фактор скорость обработки  $v$  (характеризует около 47 % изменчивости зависимой переменной). Менее значимы совокупность факторов скорость обработки и частота обработки  $vf$ .



**Рис. 2. Графики зависимостей:** *а*– глубина закалки  $h$  от скорости обработки  $v$  и частоты обработки  $f$ ; *б*– твердость поверхности  $H$  от скорости обработки  $v$  и частоты обработки  $f$

Обобщив полученные данные, можно заключить, что определяющим фактором, оказывающим значительное влияние на глубину модифицированной поверхности деталей, является совокупность факторов скорость обработки и частоты обработки  $vf$ . При увеличении частоты обработки и скорости обработки глубина закаленного слоя увеличивается. Определяющим фактором, оказывающим значительное влияние на твердость поверхностного слоя, является скорость обработки  $v$ . С увеличением скорости обработки твердость  $H$  зон закалки увеличиваются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц, А.. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрлов / под редакцией А.Г. Григорьянца. М.: МГТУ им. Баумана, 2006. 664 с.
2. Sergeev, D.G. The choice of pulse laser radiation modes for hardening a metal cutting saw / D.G. Sergeev, E.A. Marinin, N.I. Marinina, M.D. Durseneva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 971(3). P. 032024.
3. Marinin, E. The capability of pulsed laser radiation for cutting band saws hardening / E. Marinin, D. Sergeev, N. Marinina // MATEC Web of Conferences. 2017. 129. P. 01013.
4. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Д.В. Шпилькин, А.М. Шапошников

Ярославский государственный технический университет

*Рассматриваются вопросы выбора основных и вспомогательных параметров, влияющих на качество и производительность процесса газолазерной резки металлов. Рассматриваются вопросы оптимизации процесса газолазерной резки.*

*Ключевые слова:* Лазер, лазерное излучение, оптимизация режимов, газолазерная резка, качество реза, параметры резки.

## SELECTION OF PARAMETERS AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF GAS LASER CUTTING OF METALS

D.V. Shpilkin, A. M. Shaposhnikov

Yaroslavl State Technical University

*The issues of choosing the main and auxiliary parameters that affect the quality and productivity of the process of gas-laser cutting of metals are considered. The questions of optimizing the process of gas-laser cutting are considered.*

*Keywords:* Laser, laser radiation, mode optimization, gas laser cutting, cut quality, cutting parameters.

Цель работы – анализ основных и вспомогательных параметров, влияющих на качество и производительность процесса, а также, предложения по оптимизации процесса газолазерной резки металлов.

Огромное количество параметров, определяющих как качество, так и производительность газолазерной резки, в значительной степени усложняют оптимизацию процесса. Учитывая тесную связь между параметрами резки, которые, зачастую влияют друг на друга, довольно сложно подобрать их оптимальную комбинацию.

При проектировании нового технологического процесса электрофизической обработки, в качестве базы, стоит использовать технологические карты резки, предоставляемые поставщиками лазерного оборудования. Они содержат информацию по всем параметрам определяющим ка-

чество и производительность процесса (мощность ЛИ, скорость резки, давление и состав вспомогательного газа, режим работы лазера).

В случае, если нет возможности воспользоваться технологически-картами резки от поставщиков оборудования, следует подбирать оптимальные режимы опытным путем. Например, фокусное расстояние, следует увеличивать и уменьшать до тех пор, пока качество резки не начнет снижаться, а затем, следует установить значение фокусного расстояния, лежащее в середине данного интервала. То же, касается и давления вспомогательного газа. В случае со скоростью резки, рекомендуется увеличивать ее на 5 %, вплоть до ухудшения качества реза и установить значение на 10 % меньше данного. Хотя, конечно же, данный метод довольно редко встречается, ввиду того, что достичь оптимальных значений параметров резки таким способом, довольно проблематично, даже, при большом количестве выполненных тестовых резов.

Оптимизировать процесс ГЛР становится значительно проще и эффективнее, если отталкиваться от базовых значений параметров резки, определяемых поставщиками оборудования и точно изменяя их параметры, достигая максимальной эффективности, при поддержании высокой планки качества процесса ГЛР.

В лазерной размерной обработке, нет такого понятия, довольно часто встречающегося в механообработке, как: «расчет режимов резания». Все основные параметры лазерной резки, выбираются по специальным таблицам, называемым – технологические карты резки, которые предоставляются, поставщиками лазерных раскройных комплексов. Стоит отметить, что приведенные в них данные, все же, являются условными и непосредственно на производстве, требуют определенных корректировок.

Данные таблицы, составляются на основе расчетов, с последующей их проверкой опытным путем, т. е. экспериментальной резкой с комбинированием параметров обрабатываемого материала и режимов обработки. Существенное отличие от реального производства заключается в том, что, данные эксперименты проводятся зачастую в «идеальных» условиях. Для понимания: в основном, эксперименты проводятся на прокате крайне высокого качества (что далеко не всегда встречается) и с использованием новых лазеров (лазеры в процессе эксплуатации, могут терять часть мощности, а машиностроительные предприятия зачастую, покупают уже бывшие в использовании лазерные комплексы с характеристиками, отличающимися от заводских). Также нельзя не отметить тот факт, что таблицы с режимами резки составлены таким образом, чтобы найти идеальный баланс между качеством процесса резки и его производительностью (при решении реальных производственных задач, иногда



приходится жертвовать одним из этих параметров, например, при изготовлении малой партии деталей требующих крайне высокого качества, может значительно снижаться производительность и наоборот).

Иначе говоря, при проектировании процесса электрофизической обработки, табличные данные, являются ориентировочными, а реальные параметры обработки, приходится определять экспериментальным путем или же, на основе накопленного опыта использования подобного оборудования.

В вопросе оптимизации процесса ГЛР крайне важное значение имеет режим работы лазера. Так, при раскрое металлов по сложному криволинейному контуру, при обходе его углов (особенно, острых) скорость перемещения в значительной степени снижается. С уменьшением скорости резки, падает не только качество обработки, но и ее производительность. Для повышения производительности резки и одновременного поддержания высокого уровня качества выпускаемой продукции, при обработке сложных контуров, применяется импульсный режим работы лазера. Максимальный эффект размерной обработки достигается при комбинировании режимов генерации излучения. Для примера: на прямых участках большой протяженности, используется непрерывное излучение, а при прохождении острых углов, происходит плавный переход к импульсному режиму с управляемой ЧПУ мощностью лазера. Данная комбинация режимов обработки обеспечивают минимальную величину зоны термического влияния (ЗТВ) и способствует отсутствию деформаций у вырезанных лазером изделий.

Не менее важно, при создании управляющей программы для лазерного раскройного комплекса предусматривать локальные отклонения от стандартных режимов газолазерной резки. Например, при проектировании в ПО для раскроя листового металла, опытным путем было доказано, что следующие изменения стандартных режимов обработки при прохождении углов (рис. 1) позволяют повысить производительность процесса, не снижая качество раскроя. На рис. 1 продемонстрирован фрагмент, представляющий собой локальное изменение стандартных режимов лазерного раскроя листового металла при прохождении угла: за 4 мм до угла, происходит снижение скорости резки до 70 %, с увеличением ширины реза до 110 %, от базовых значений. По прохождении 2 мм, происходит снижение скорости резки до 60 %, с увеличением ширины реза до 115 %, от базовых значений. Обработка угла, проводится на данных режимах.

**Feedrate%(70), Kerf%(110), Move(2.0), Feedrate%(60), Kerf%(115), Move(2.0)**

**Рис. 1. Изменение параметров обработки при прохождении угла**

На рисунке 2 продемонстрирован фрагмент, представляющий собой локальное изменение стандартных режимов лазерного раскроя листового металла при выходе с траектории прохождения угла: в точке, расположенной в 2 мм после угла, происходит увеличение скорости до 80 % и снижение ширины реза до 105 %, от базовых, по прохождении еще 2 мм, происходит переход к базовым значениям параметров обработки.

`Move(2.0), Feedrate%(80), Kerf%(105), Move(2.0), Feedrate%(100), Kerf%(100)`

**Рис. 2. Изменение параметров обработки по прохождении угла**

Данные изменения, вкпе с корректировкой параметров заходов на вырезаемый контур и выходов с него, а также, изменения параметров прохождения дуг с радиусом меньше 15 мм позволили снизить время резки 231 заготовки из листа Стали 20 размерами 3000x1400x6 мм на 24 минуты.

Подводя итог, стоит отметить, что процесс газолазерной резки является крайне сложным и использование стандартных режимов далеко не всегда является единственно верным решением. Для оптимизации процесса ГЛР важную роль играет экспериментальная резка, но в первую очередь (в виду высокой стоимости процесса) стоит более активно использовать различного рода программные комплексы и математическое моделирование, для прогнозирования влияния изменения параметров на качество и производительность процесса газолазерной резки металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*1. Григорьянц, А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

**М.С. Ермаков, А. В. Соколов, М.А. Червочкин, В.В. Соловьев**

Ярославский государственный технический университет

*В работе была подтверждена методика, позволяющая количественно определить скорость и степень изменения коррозии при металлообработке путем измерения защитных свойств различных индустриальных масел по поляризационному сопротивлению.*

**Ключевые слова:** изменение коррозии, защитные свойства, литиевые пластичные смазки, датчики, поляризующее напряжение.

## INVESTIGATION OF PROTECTIVE PROPERTIES OF LUBRICANTS IN METAL MACHINING

**M.S. Ermakov, A.V. Sokolov, M.A. Chervochkin, V.V. Solovyov**

Yaroslavl State Technical University

*The paper confirmed a technique that allows quantifying the rate and degree of change in corrosion during metalworking by measuring the protective properties of various industrial oils by polarization resistance.*

**Keywords:** corrosion change, protective properties, lithium greases, sensors, polarizing voltage.

В настоящей работе рассматривается простой и доступный способ определения свойств смазок отечественных и импортных образцов и дается предварительное сравнение полученных результатов предлагаемым методом и методом анализа на сложной аналитической аппаратуре зарубежного производства с целью импортозамещения иностранных аналогов.

Известно, что для определения антикоррозионных свойств смазок у нас в стране (ГОСТ 9.054-75) и за рубежом иногда используют методы, основанные на визуальной оценке изменения внешнего вида пластинок из различных металлов после достаточно длительного контакта их со смазкой при обычной или повышенной температуре [1, 2]. При отсутствии дорогостоящего аналитического и технологического (импортного) оборудования у многих малых предприятий Российской

Федерации, такой метод может найти широкое применение при условии положительных результатов, полученных в ходе настоящей работы. В ходе предварительных исследований нами была предложена ранее разработанная еще в Советском Союзе методика ВНИИПКнефтехима, позволяющая количественно определить скорость и степень коррозии путем измерения защитных свойств масел по поляризационному сопротивлению [3]. Для определения защитных свойств масел и литиевых пластичных смазок был использован датчик, состоящий из склеенных изолирующим клеем четырех стальных пластин, изготовленных из сталей: ШХ9, ШХ12, ШХ15 или ШХ15СГ. Рабочую поверхность датчика обрабатывали с помощью шлифовальной шкурки до 7 - 8-го класса чистоты. Датчик промывали в углеводородном растворителе, сушили и проверяли на межэлектродное замыкание. Для определения защитных свойств масла подготовленный к экспериментам датчик погружали на 1 мин в испытуемое масло, затем извлекали и выдерживали на воздухе в подвешенном состоянии не менее 24 часов. Для определения защитных свойств смазки на подготовленный датчик с двух сторон наносили испытываемое минеральное масло или полученную на его основе литиевую смазку.

Испытания защитных свойств масла и смазки проводили одновременно на четырех датчиках, изготовленных из сталей ШХ9, ШХ12, ШХ15, ШХ15СГ. Все датчики (не менее пяти) помещали в раствор электролита, приготовленного по ГОСТ 9.054-75 и выдерживали в нем при комнатной температуре в течение 5 и 25 часов соответственно. На каждый датчик, погруженный в электролит, подавали поляризующее напряжение 10 мВ, а возникающий ток регистрировали с помощью потенциометра-гальванометра. Скорость коррозии  $i_K$  (в мм/год) определяли по известному уравнению в виде:

$$i_K = K\Delta I,$$

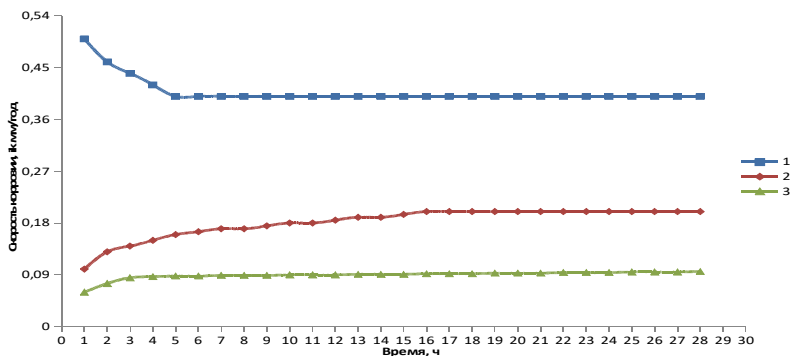
где  $K$  — коэффициент пересчета поляризационного сопротивления в скорость коррозии;

$\Delta I$  — сила тока, измеряемая прибором, до и после подачи поляризующего напряжения.

В ходе исследований было установлено, что толщина слоя смазки влияет на точность определения и воспроизводимость экспериментальных результатов. После проведения ряда опытов было показано, что оптимальной толщиной слоя смазки может считаться 30 мк. При такой толщине среднеквадратичная ошибка определения скорости коррозии и доверительный интервал кривых скорости коррозии

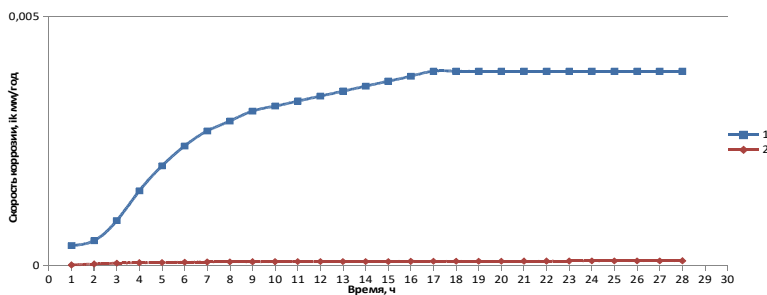
стали оказались наименьшими.

На рисунках 1 и 2 представлены кинетические кривые изменения коррозионного процесса датчика, изготовленного из стали ШХ15. В качестве нефтяного масла использовали промышленное масло И-20А, произведенное на ярославском ПАО «Славнефть-ЯНОС», а в качестве литевой смазки применяли образцы, изготовленные на основе того же масла с литевым загустителем по традиционной технологии.



**Рис. 1. Кинетика коррозионного процесса стали ШХ-15 в растворе электролита:**

**1 - незащищенный датчик; 2 - датчик под пленкой минерального масла И-20А; 3 - датчик под пленкой минерального масла И-20А с 2 % мас. ингибитора коррозии  $\text{NaNO}_2$**



**Рис. 2. Кинетика коррозионного процесса стали ШХ-15 в растворе электролита:**

**1 — под слоем негибрированной смазки приготовленной на основе 12-оксистеариновой кислоты и минерального масла И-20А; 2 — под слоем смазки 2 % мас. ингибитора коррозии  $\text{NaNO}_2$**

Из рисунка 1 видно, что скорость, коррозии незащищенного датчика и с нанесенной на него пленкой нефтяного масла после 5

часов испытания в среднем составляла 0,19-0,20 мм/год (образец 1) и 0,14-0,15мм/год (образец 2). Эти данные были получены за счет разницы значений  $i_K$  за период от 1 до 5 часов обработки. Дальнейшие значения коэффициента скорости коррозии практически не изменялись с 5 до 30 часов обработки. Следовательно, нефтяное масло характеризуется невысокими защитными свойствами. Введение в испытуемое масло 2 % мас. нефтерастворимого ингибитора коррозии  $\text{NaNO}_2$  уменьшает скорость коррозии до 0,065-0,070 мм/год (образец 3). Анализ данных, представленных на рисунке 2, показал, что присутствие в нефтяном масле 12-оксистеарата лития с концентрацией 10 % мас. улучшает его защитные свойства; скорость коррозии при этом составляет 0,0075 мм/год (образец 1). Введение 2 % мас. нефтерастворимого ингибитора  $\text{NaNO}_2$  коррозии в смазку существенно уменьшает скорость коррозии датчика — до 0,00085 мм/год (образец 2).

Сравнение результатов визуального осмотра практически всех пластин, изготовленных из разных марок металла ШХ, после проведения испытаний на коррозионное воздействие по ГОСТ 9.054-75 с цифровым выражением скорости коррозии по разработанной методике показало практически одинаковые числовые значения изменения защитных свойств масел и пластичных смазок, определенных на отечественных и зарубежных приборах с результатами данных, полученных на датчиках, применяемых в настоящей работе.

На последнем этапе работ по просьбе ряда заказчиков были проведены исследования кинетических процессов коррозии на более современных приборах фирмы MAXWELL NDT — PECT (производитель — Великобритания) и отечественном NTB Classic (производитель — Россия), имеющихся в их распоряжении [4], где также были получены близкие по сходимости результаты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврушин, А.В. Консервационные масла, применяемые для защиты изделий техники. Рязань, 2021. URL: <https://science.swsu.ru/jour/article/view/878>.
2. Виноградов, П.А. Консервация изделий машиностроения / П.А. Виноградов и др. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 270 с.
3. Порущкий, Г.В. Инструкция по методике лабораторных испытаний и оценке смазочно-охлаждающих жидкостей на биотойкость / Г.В. Порущкий и др. Киев. Изд-во ВНИИПКнефтехим, 1972. 28с.
4. Метрология и испытания. Приборы для измерения коррозии. М., 2021. URL: <https://www.directindustry.com.ru/proizvoditel-promyshlennyj/pribor-izmereniakorrozii-210923.html>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯРНЫХ  
ИНГРЕДИЕНТОВ, ПРИСУТСТВУЮЩИХ В РАЗЛИЧНЫХ  
ПРИСАДКАХ И МАСЛАХ НА ПРОЦЕСС АДсорбЦИИ  
ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**М.С. Ермаков, Л.О. Огурцов, А.В. Соколов, В.В. Соловьев**

Ярославский государственный технический университет

*В работе приведены исследования по влиянию различных полярных ингредиентов, присутствующих в традиционных присадках и маслах отечественного производства на процесс адсорбции и противоизносные свойства технологического оборудования. Установлено, что для образования прочной граничной пленки на поверхности металла при использовании различных присадок требуется не одинаковое время: хлорсодержащие присадки адсорбируются мгновенно, серосодержащие присадки требуют продолжительного времени для осуществления процесса адсорбции*

***Ключевые слова:** полярные ингредиенты, адсорбция, противоизносные свойства, технологическое оборудование*

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POLAR INGREDIENTS PRESENT IN VARIOUS ADDITIVES AND OILS ON THE ADSORPTION PROCESS AND ANTI-WEAR PROPERTIES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

**M.S. Ermakov, L.O. Ogurtsov, A.V. Sokolov, V.V. Solovyov**

Yaroslavl State Technical University

*The paper presents studies on the influence of various polar ingredients present in traditional additives and oils of domestic production on the adsorption process and anti-wear properties of technological equipment. It is established that the formation of a strong boundary film on the metal surface when using various additives does not require the same time: chlorine-containing additives are adsorbed instantly, sulfur-containing additives require a long time to carry out the adsorption process*

***Keywords:** polar ingredients, adsorption, anti-wear properties, technological equipment*

При работе в стабильных температурных режимах и при небольших нагрузках многие производители смазочных материалов, а также их

дилеры, для смазки ненагруженных узлов трения рекомендуют использовать бюджетные веретенные или индустриальные масла минерального происхождения без добавления присадок. Однако такие масла не подходят для высокооборотистых станков и нагруженных конструкций с замкнутой системой циркуляционной смазки [1]. По этой причине большинство компьютерно-интегрированных технологий в машиностроении предполагает использование технологических станков и оборудования, которые должны применять индустриальные масла с присадками.

Преимущество таких индустриальных масел состоит в том, что они повышают срок сервисного обслуживания оборудования, улучшают производительность и уменьшают износ узлов трения техники в 2-4 раза по сравнению с обычными маслами [1]. Выбор масла и набора в нем присадок является серьезной задачей, которая требует знания нюансов не только технологических аспектов использования по соответствующему назначению технологического оборудования, но и физико-химических тонкостей, связанных с образованием прочной адсорбционной пленки на поверхности обрабатываемого металла (самого станка) в зависимости от типа применяемых присадок.

В качестве базового масел использовались минеральное масло ЗМ ГОСТ 7936-76 со следующими загущающими полимерными присадками: АБС-2, Совол, ЛЗ-318, ТКФ, ХП-470. Присадка АБС-2 ГОСТ 12275-66 была получена путем хлорметилирования алкилбензолов. Совол ГОСТ 6581-75 — путем добавления пентахлордифенила к трансформаторному маслу ГК, а ЛЗ-318 ТУ 0254-312-00148820-96 представлял собой промышленный образец полужидкой смазки ЛЗ, полученный из нефтяных масел, загущенных литиевым мылом 12-оксистеариновой кислоты. Все эти присадки произведены на заводе масел «Ангарской нефтехимической компании». Присадка ТКФ ГОСТ 5728-76 компании «Роснефть» является ингибитором коррозии, получаемым путем взаимодействия крезола и ортофосфорной кислоты. Присадка ХП-470 представляет из себя хлорированный парафин, выпускаемый компанией «Химпэк».

В качестве базового компонента, используемого для сравнения минерального масла ЗМ ГОСТ 7936-76 с соответствующими добавками, применялась искусственно приготовленная смесь на основе минеральных индустриальных масел И-20А и И-40А производства ПАО «Славнефть-ЯНОС», обозначенное в настоящих исследованиях образец № 20 и № 40 соответственно.



Изучение адсорбции смазочного материала проводилось на четырехшариковой машине трения с диаметром шаров 9,52 мм, числом оборотов верхнего шара 1250 в минуту с точностью определения  $P_k \pm 2,5$  кГ. Опыты показали, что между адсорбцией и противоизносными свойствами в пределах одной масляной основы в основном существует прямая связь, т.е., чем выше адсорбция, тем лучше противоизносные свойства. При этом было установлено, что присадки в процессе адсорбции могут образовывать как электроположительные (+), так и электроотрицательные (-) слои на поверхности металла. Поэтому величина адсорбции оценивалась методом контактной разности потенциалов (КРП) по их абсолютному значению (см. табл. 1).

**Таблица 1. Критическая нагрузка заедания  $P_k$  (кГ) и величина контактной разности потенциалов (КРП) (мВ) для масел с различными присадками\***

Масла	Тип присадок для которых значения КРП приводятся после 20-минутной выдержки									
	Совол		ЛЗ-318		АБС-2		ТКФ		ХП	
	$P_k$	КРП	$P_k$	КРП	$P_k$	КРП	$P_k$	КРП	$P_k$	КРП
ЗМ	110	-170**	75	-100	55	+70	110	-85	115	-170
Образец № 20	130	-170	100	-85	70	-15	95	+45	85	-195
Образец № 40	105	-75	100	-55	65	-10	85	+55	75	-80

\* Значения КРП приводятся после 20-минутной выдержки.

\*\* Присадки в процессе адсорбции могут образовывать как электроположительные, так и электроотрицательные слои на поверхности металла; величина адсорбции оценивалась по абсолютному значению КРП.

Исключением являются три композиции: присадка ТКФ в загущенном масле и присадка ХП в минеральных образцах № 20 и № 40. Кроме того, на адсорбцию присадок из масла могут также оказывать влияние полярные ингредиенты. К ним, как правило, относятся смолы, содержащиеся в молекуле кислород, серу и азот, а также полициклические ароматические углеводороды, в молекуле которых может присутствовать сера, наличие которой в масле связано со степенью его очистки. Лучшая адсорбция присадок в образце № 20 объясняется тем, что в нем содержится меньшее количество полярных веществ (7-8 % мас), чем в образце № 40 (10-11 % мас). Эти значения были найдены при помощи стандарт-

ного метода с использованием метода хроматографии на силикагеле.

Влияние смол на адсорбцию присадок было проверено прямым путем. Для этого были испытаны авиационные масла, лишенные примесей МС-8П и МС-20. Масло МС-8П исследовалось с введенными в него присадками ХП в количестве 7,5 % мас и АБС-2 в количестве 7,5% мас. В эти же образцы масла МС-8П были добавлены присадки на основе смол масла МС-20 в количестве 3 % мас, выделенных также методом хроматографии на силикагеле.

После 10-минутной выдержки металлических пластинок в названных смесях определялось значение КРП. У масла МС-8П с добавками 7,5 % мас ХП оно составило — 225 мв, у МС-8П с добавками 7,5 % мас АБС-2 значение величины контактной разности потенциалов составило + 65 мв. После добавления смол масла МС-20 КРП у первой смеси была –165 мв, у второй –75 мв у масла МС-8П с добавками 3% мас смол масла МС-20 значение величины контактной разности потенциалов составило – 65 мв. Эти данные показывают, что присутствие в масле смолистых веществ оказывает неблагоприятное влияние на адсорбцию из них присадок: снижается адсорбция хлорсодержащих соединений и подавляется адсорбция серосодержащих продуктов.

Кроме наличия в масле полярных веществ, на адсорбцию присадок, по-видимому, какое-то влияние оказывает также вязкость растворителя при температуре опыта: у образцов № 20 и № 40 вязкость при температуре опыта соответственно равна  $483 \pm 5$  и  $592 \pm 5$  сст. Повышенная вязкость образца № 40 и большее содержание в нем полярных веществ, привели к уменьшению адсорбции присадок на металле по сравнению с образцом № 20.

Большое влияние на противоизносные свойства может оказывать скорость адсорбции присадок из масла, т. е.  $\frac{\Delta \text{КРП}}{\Delta \tau} \approx \frac{d\varphi}{d\tau}$ , где  $\varphi$  — работа выхода электрона,  $\tau$  — время выдержки металлической пластины в масле. В соответствии с этим в предыдущей работе была изучена адсорбционная способность присадок ХП и АБС-2 в растворе загущенного масла. Полученные результаты, приведенные в этой работе, результаты опытов показали, что хлорированный парафин на металлической поверхности адсорбируется почти мгновенно, так как для него характерно большое значение отношения  $\frac{d\varphi}{d\tau}$ , в то время, как адсорбция присадки АБС-2 из того же масла идет намного медленнее (см. таблицу 1). Кроме того, абсолютное значение  $\Delta$  КРП в первом случае значительно больше, чем во втором.

Эти данные свидетельствуют о том, что для образования прочной граничной пленки на поверхности металла для различных присадок требуется не одинаковое время: хлорсодержащие присадки адсорбируются мгновенно, серосодержащие присадки требуют продолжительного времени для осуществления процесса адсорбции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Манг, Т.* Смазки материалы. Производство, применение, свойства: справочник / Манг Т., Дрезель У. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 944 с.

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА АДсорбЦИИ ПРИСАДОК  
И МАСЕЛ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ**

**Л.О. Огурцов, М.А. Червочкин, А.В. Соколов, В.В. Соловьев**

Ярославский государственный технический университет

*В работе изучен процесс адсорбции присадок и масел различного химического состава на противоизносные свойства технологического оборудования и станков с числовым программным управлением методом контактной разности потенциалов.*

*Ключевые слова:* адсорбция, присадки, минеральные масла, противоизносные свойства, технологическое оборудование.

**STUDY OF THE PROCESS OF ADSORPTION  
OF ADDITIVES AND OILS OF VARIOUS CHEMICAL  
COMPOSITIONS ON THE ANTI-WEAR PROPERTIES  
OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT BY  
THE CONTACT POTENTIAL DIFFERENCE METHOD**

**L.O. Ogurtsov, M.A. Chervochkin, A.V. Sokolov,  
V.V. Solovyov**

Yaroslavl State Technical University

*The paper studies the process of adsorption of additives and oils of various chemical compositions on the anti-wear properties of technological equipment and machines with numerical software control by the contact potential difference method.*

*Keywords:* adsorption, additives, mineral oils, anti-wear properties, technological equipment.

Технология и оборудование механической токарной обработки, сверления, резьбонарезания, фрезерования и шлифования — как на индивидуальных станках, так и автоматических линиях при использовании станков с числовым программным управлением (ЧПУ) предполагает обязательное использование наиболее перспективных на сегодняшний день смазочных материалов как зарубежных, так и отечественных производителей [1]. Для придания уникальных технологических свойств в базовые

смазочные материалы в обязательном порядке должны вводиться технологические добавки, а также присадки для повышения адсорбции смазочного материала, покрывающего металлические поверхности.

Одним из наиболее надежных способов определения адсорбции является энергетический, основанный на измерении работы выхода электрона методом контактной разности потенциалов (КРП) [2]. Однако широкое использование современных приборов для изучения процессов адсорбции масляных жидкостей на твердой поверхности обрабатываемой детали и инструмента в настоящее время ограничивалось сложностью их конструкции, а также необходимостью работы при высоком вакууме (порядка  $10^{-6}$  мм. рт. ст) [3]. Все это сильно сдерживает научно-исследовательские работы, связанные с проблемой импортозамещения присадок и масел различного химического состава для современных обрабатывающих комплексов. В бывшем Советском Союзе был создан простой по конструкции прибор, который позволяет при сравнительно не сложном эксперименте получать надежные результаты по адсорбции присадок и масел различного химического состава [4].

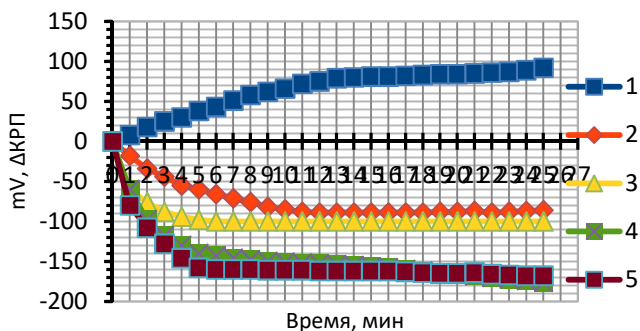
Для исследования были использованы три различных масла: промышленный образец загущенного масла — 3М ГОСТ 7936-76, который представлял собой минеральное масло с загущающими полимерными присадками. Два других образца под условным названием № 20 и № 40 были получены путем смешения попарно двух различных минеральных масел, выпускаемых ПАО «Славнефть-ЯНОС» И-20А и И-40А с присадками АБС-2, Совол, ЛЗ-318, ТКФ, ХП-470.

Присадка АБС-2 ГОСТ 12275—66 (бис-(алкилбензил)-дисульфид) была получена путем хлорметилирования алкилбензолов и выпускается *«Ангарской нефтехимической компанией»*. Присадка Совол ГОСТ 6581-75 была получена путем добавления пентахлордифенила к трансформаторному маслу ГК. Она производится компанией «Роснефть» на заводе масел *«Ангарской нефтехимической компании»*. Присадка ЛЗ-318 ТУ 0254-312-00148820-96 представляла собой промышленный образец полужидкой смазки ЛЗ, которая была изготовлена из смеси нефтяных масел, загущенных литиевым мылом 12-оксистеариновой кислоты, произведенных на заводе масел *«Ангарской нефтехимической компании»*. В состав этой смазки входили дисульфид молибдена, а также присадки, улучшающие антиокислительные, противозадирные, противоизносные и другие свойства. Присадка ТКФ ГОСТ 5728-76 представляла из себя промышленный образец ингибитора коррозии, полученный путем взаимодействия крезоло и ортофосфорной кислоты. Известно, что трикрезил-

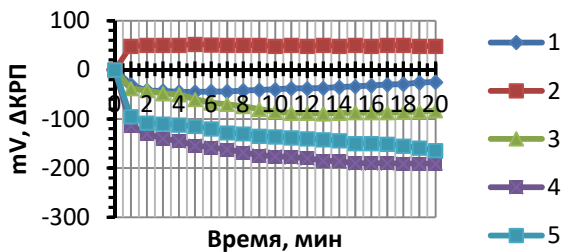
фосфат обладает высокой сопротивляемостью к трению, устойчивостью к климатическим воздействиям и грибковым поражениям, что особенно важно в процессе промышленной металлообработки. Производитель этого вида присадки является компания «Роснефть». Присадка ХП-470 представляет из себя хлорированный парафин, выпускаемый компанией «Химпэк». Все вышеобозначенные присадки загружались в минеральные масла в одной и той же концентрации.

Известно, что адсорбция атомов, радикалов или молекул на поверхности твердого тела может уменьшать или увеличивать коррозионную разность потенциалов (КРП). Это, как правило, зависит от типа связи адсорбат-адсорбент, состояния поверхности адсорбента и его состава. На основании этого в настоящей работе адсорбция смазочного материала на металлической поверхности обрабатывающего оборудования оценивалась по абсолютному значению КРП, а также по скорости ее изменения во времени.

Из рисунков 1, 2, 3 видно, что с увеличением времени выдержки металла в маслах адсорбция присадок на нем повышается. Это особенно заметно у хлорсодержащих присадок (Совол, ХП-470), которые по адсорбционной способности превосходят все другие изученные присадки.

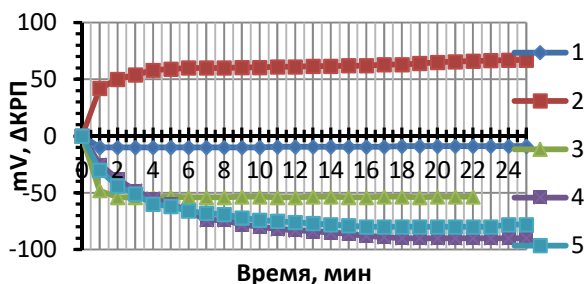


**Рис. 1.** Кинетика изменения контактной разности потенциалов (mV, ΔКРП) в процессе адсорбции присадок на металле, введенных в загущенное масло  
 Присадки: 1 — АБС-2; 2 — ТКФ; 3 — ЛЗ-318; 4 — ХП; 5 — Совол



**Рис. 2.** Кинетика изменения контактной разности потенциалов ( $mV$ ,  $\Delta KPP$ ) в процессе адсорбции присадок на металле, введенных в образец № 20

Номер присадки соответствует нумерации рис. 1.



**Рис. 3.** Кинетика изменения контактной разности потенциалов ( $mV$ ,  $\Delta KPP$ ) в процессе адсорбции присадок на металле, введенных в образец № 40

Номер присадки соответствует нумерации рис. 1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
2. Гамаюнов, Ю.Г. Контактная разность потенциалов. Саратов: Изд-во центр «Наука», 2007. С.3-19.
3. Милонова, Л.И. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей машин: учебное пособие / Л.И. Милонова, Л.А. Кондратенко. Феникс, 2021. 255 с.
4. Марков, А.А. Изучение адсорбции присадок из масел различного химического состава и ее связи с противозносными свойствами / А.А. Марков, Г.И. Кичкин, В.Л. Лаших // Химия и технология топлив и масел. 1970. № 10. С. 23-29.

## ВЛИЯНИЕ ЭМУЛЬГАТОРОВ НА АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИОННЫХ СОЖ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

М.А. Червочкин<sup>1</sup>, В.В. Соловьев<sup>1</sup>, Л.О. Огурцов<sup>1</sup>,  
А.В. Кудричев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет  
<sup>2</sup>ООО «Импульс»

*В работе исследуется влияние различных типов эмульгаторов на антикоррозионные свойства эмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей отечественного производства, используемых на станках с числовым программным управлением.*

**Ключевые слова:** эмульгатор, СОЖ, антикоррозионная защита, компьютерно-интегрированное оборудование, металлообработка.

## THE EFFECT OF EMULSIFIERS ON THE ANTICORROSIVE PROPERTIES OF EMULSION COOLANT IN METALWORKING

<sup>1</sup>M.A. Chervochkin, <sup>1</sup>V.V. Solovyov, <sup>1</sup>L.O. Ogurtsov,  
<sup>2</sup>A.V. Kudrichev

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University  
<sup>2</sup>LCC «Impulse»

*The paper investigates the influence of various types of emulsifiers on the anti-corrosive properties of emulsion lubricants of domestic production used on machines with numerical control.*

**Keywords:** emulsifier, coolant, corrosion protection, computer-integrated equipment, metalworking.

Тенденция оснащения отечественных машиностроительных и обрабатывающих промышленных предприятий современными высокоточными станками и оборудованием влечет за собой изменение типа и качества расходных материалов. Это в основном относится к смазочным материалам в особенности для тяжелонагруженной компьютерно-интегрированной техники, станков с числовым программным управлени-



ем (ЧПУ) [1].

Отечественные химические предприятия сегодня предлагают широкий ассортимент традиционных минеральных и легированных индустриальных масел с улучшенными технологическими характеристиками взамен импортных образцов, которые до недавнего времени занимали лидирующее место в отечественном машиностроении при использовании их на импортных металлообрабатывающих комплексах и станках с ЧПУ. Однако следует констатировать тот факт, что для каждого механизма или конкретного станка важен грамотный подход в подборе смазки. Также необходим тщательный анализ свойств используемого масла, знаний какими особенностями оно обладает (вязкость, совместимость с различными материалами, фильтруемость, антикоррозионная защита и др.). Чтобы надежно защитить все элементы станка или обрабатывающего комплекса и способствовать эффективной и длительной эксплуатации техники, применяемые масла должны соответствовать виду оборудования и соблюдать требуемую чистоту обрабатываемой поверхности деталей ( $\nabla 6 - \nabla 8$ ).

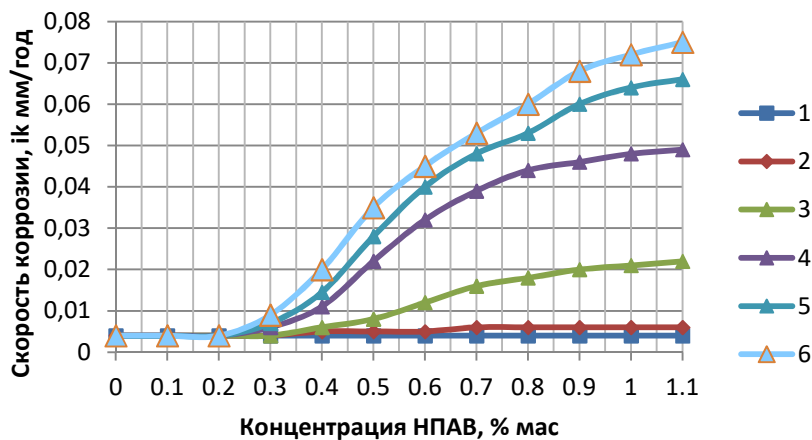
Для обеспечения данного качества поверхности обрабатываемых изделий и надежной эксплуатации механизмов и оборудования СОЖ должны обладать удовлетворительными антикоррозионными свойствами, в частности, скорость коррозии черных металлов в рабочих эмульсиях не должна превышать  $10^{-2}$  мм/год [2].

Эмульсии, используемые при обработке металлов, представляют собой, как правило, многокомпонентные системы, содержащие помимо воды поверхностно-активные вещества различного строения и назначения, минеральные и жировые масла, противозадирные и противоизносные присадки и тд. Коррозионное воздействие таких систем на металлы зависит от многих факторов, в том числе жесткости воды, химической природы и концентрации вводимых в СОЖ добавок и присадок.

Несмотря на значительное число работ [3], посвященных исследованию коррозионного воздействия на металлы водных СОЖ, влияние отдельных компонентов до конца не выяснено. Цель данной работы заключалась в изучении влияния неионогенных эмульгаторов на антикоррозионные свойства некоторых типичных компонентов эмульсионных СОЖ. Объектами исследования служили модельные системы (водные эмульсии или растворы), содержащие помимо неионогенного эмульгатора анионный эмульгатор, жировой компонент и минеральное масло. Из неионогенных эмульгаторов испытывали товарные продукты — полиэтиленгликолевые эфиры высших жирных спиртов (синтанол ДС-10), полиэтиленгликолевые эфиры стеариновой кислоты (стеарокс-6), моноэтаноламида жирных кислот (синтаид-5) и алкилфенолов (эмульгаторо-

ры ОП-4, ОП-7 и ОП-10). Анионным эмульгатором (жировым компонентом) служило мыло на основе триэтаноламина (ТЭА) и жирных кислот таллового масла. В качестве минерального масла применяли масло индустриальное марки И-20А предприятия ПАО «Славнефть-ЯНОС».

При исследовании - использовали метод поляризационного сопротивления [4], позволяющий проводить количественную оценку антикоррозионных свойств водных систем при их контакте с различными металлами. Измеряли скорость коррозии  $I_K$  отливок со специальными свойствами из серого чугуна марки СЧ 18 ГОСТ 1412-85 (международный стандарт - Kst 81-033:2009) в объеме эмульсий или растворов. Изучение кинетики коррозии в данных системах показало, что  $I_K$  через 3 часа после погружения металла в жидкость достигает практически постоянных значений (рис. 1). Поэтому при изучении влияния концентрации неионогенных эмульгаторов на скорость коррозии чугуна измерение скорости проводили через 3 часа после погружения металла в эмульсию. Оценку антикоррозионных свойств модельных систем проводили при постоянной концентрации мыла 0,25 % мас. Водный раствор мыла такой концентрации обеспечивает минимальную скорость коррозии чугуна марки СЧ 18.



**Рис. 1.** Влияние концентрации НПАВ на скорость коррозии чугуна  $I_K$  в эмульсиях, содержащих 0,25 % мас. мыла, 1,75 % мас. жирового компонента и 2,5 % мас минерального масла: 1 - ОП-4; 2 - синтаמיד-5; 3 - стеарокс-6; 4 - ОП-7; 5 - ОП-10; 6 - синтанол ДС-10

Исследование влияния различных неионогенных поверхностно активных веществ (НПАВ) на антикоррозионные свойства водных эмуль-

сий, содержащих 0,25 % мыла, 1,75 % жирового компонента и 2,5 % минерального масла, показало, что скорость коррозии отливок со специальными свойствами из серого чугуна в таких системах не зависит от природы неионогенных эмульгаторов при концентрации до 0,25 % мас. (см. рис. 1).

Установлено, что при более высоких концентрациях НПАВ скорость коррозии зависит от числа оксиэтильных групп в молекуле эмульгатора; с увеличением оксиэтильных групп с 4 до 10 в ряду эмульгаторов ОП-4, ОП-7 и ОП-10 скорость коррозии возрастает в 60-80 раз (см. рис. 1, соответственно кривые 1, 4, 5). В то же время природа гидрофобной части НПАВ не оказывает заметного влияния на скорость коррозии (см. рис.1, кривые 1, 2 и 5, б).

Таким образом было показано, что введение до 0,25 % мас, неионогенных эмульгаторов, имеющих в молекуле более 5 оксиэтильных групп, приводит к ухудшению антикоррозионных свойств эмульсионных СОЖ. В эмульсиях, содержащих до 0,25 % мас. этих эмульгаторов или НПАВ с числом оксиэтильных групп в молекуле 5 и менее, скорость коррозии чугуна не превышает  $5 \cdot 10^{-3}$  мм/год, что характерно для СОЖ, весьма инертных по коррозионному воздействию на металлы.

Результаты исследования влияния неионогенных эмульгаторов на антикоррозионные свойства модельных эмульсий (и растворов) были использованы авторами при разработке новых высокоэффективных СОЖ на предприятии ООО «Импульс», а для промышленной опробации при обработке металлов были переданы малым предприятиям ООО «Энергостройсервис» и «Виразж-Е».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макарова, И.А.* Разработка новых композиций на основе смазочно-охлаждающих жидкостей и углеродных нанотрубок / И.А. Макарова, М.В. Бузаева. Ульяновск, 2016. 122 с.
2. *Ошер, Р.Н.* Производство и применение СОЖ / под ред. П.А. Ребиндера. Москва, 1963. 222 с.
3. *Манг, Т.* Смазки материалы. Производство, применение, свойства: справочник / Манг Т., Дрезель У. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 944 с.
4. *Худобин, Л.В.* Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Бульжёв и др. Под общ. Ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ АКВОЛ 14 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕЕ НА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКАХ С ЧПУ

<sup>1</sup>Л.О. Огурцов, <sup>1</sup>М.А. Червочкин, <sup>1</sup>В.В. Соловьев, <sup>2</sup>  
А.В. Кудричев

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет  
<sup>2</sup>ООО «Импульс»

*В работе исследуется метод оценки коррозионной агрессивности смазочно-охлаждающей жидкости Аквол-14 при использовании ее на металлообрабатывающих комплексах.*

*Ключевые слова:* коррозионная агрессивность, смазочно-охлаждающая жидкость, металлообработка.

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE CORROSION AGGRESSIVENESS OF THE AQUOL 14 COOLANT WHEN USING IT ON CNC METALWORKING MACHINES

<sup>1</sup>L.O. Ogurtsov, <sup>1</sup>M.A. Chervochkin, <sup>1</sup>V.V. Solovyov, <sup>2</sup>  
A.V. Kudrichev

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University  
<sup>2</sup>LCC «Impulse»

*The paper investigates a method for assessing the corrosion aggressiveness of the Akvol-14 coolant when used in metalworking complexes.*

*Keywords:* corrosion aggressiveness, coolant, metalworking.

Технология и оборудование механической и физико-технической обработки литейного чугуна, стали, алюминия и его сплавов при средних по тяжести и тяжелых операциях на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) требуют обязательного использования современных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) [1]. Сегодня из основных технологических требований, предъявляемых к СОЖ как зарубежных, так и отечественных производителей является их низкое коррозионная агрес-

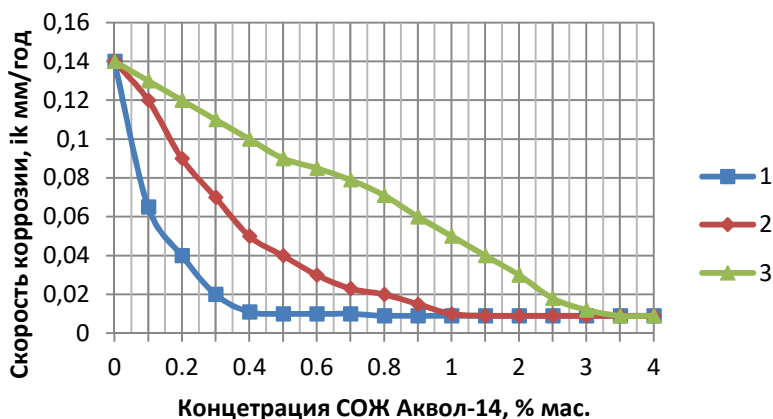
сивность [2], способом контроля которой является метод поляризационного сопротивления, позволяющий измерять практически мгновенные изменения значения скорости коррозии металла, погруженного в объем масляных компонентов, включая СОЖ, а также следить за кинетикой коррозионного процесса [3].

В ходе предварительных исследований по использованию разнообразных отечественных и зарубежных СОЖ таких как: Аквол-14 (ТУ 384 01-88-81), Укринол-1, НГЛ-205, Syntilo R-4 фирмы Castrol, Хостакор V-4154 (Хехст, Германия) на станках с ЧПУ мод. SIW-5 UB на операциях шлифования роликовой дорожки колец подшипников в ряде случаев было установлено несоответствие результатов оценки коррозионной агрессивности смазочно-охлаждающих жидкостей, приготовленных на минеральной основе по ГОСТ 6243-75, применяемому в настоящее время, и методу поляризационного сопротивления. Поэтому задача данной работы состояла в выяснении причины таких различий, а также в разработке экспресс-метода оценки коррозионной агрессивности СОЖ, результаты испытаний по которому соответствовали бы ГОСТ 6243-75. Все дальнейшие исследования проводили на примере СОЖ Аквол-14, представляющее собой нефтяное минеральное масло И8А с добавлением эмульгаторов, противозадирной, антикоррозионной, биоцидной присадок и пеногасителей.

В ходе проведенных исследований было установлено, что основной причиной обнаруженного несоответствия являются различные условия проведения испытаний. В случае придерживания условий ГОСТа небольшой объем смазочно-охлаждающей жидкости необходимо наносить на стружку, образующуюся в процессе металлообработки. При этом было установлено, что ингибиторы коррозии, входящие в состав СОЖ, начинают адсорбироваться на стружке, в результате чего их концентрация в объеме СОЖ, находящейся над обрабатываемой деталью и стружкой уменьшается. Это подтвердилось при измерении кривых дифференциальной емкости в зависимости от потенциала ( $C - \varphi$ ) на ртутном капельном электроде в СОЖ до и после контакта его со стружкой в условиях, предусмотренных ГОСТ 6243—75 (Прибор для измерения проводимости PS 2000, производства Германия). Эти результаты оказались аналогичными для случая контакта СОЖ с порошком  $Fe_2O_3$ , окиси молибдена, графита и графена[4]. В ходе работы смазочно-охлаждающей жидкости на обрабатывающем машиностроительном комплексе со временем наблюдалось уменьшение концентрации СОЖ. Дальнейшими исследованиями было показано (установлено), что это происходит в результате адсорбции поверхностно-активного вещества (ПАВ), присутствующего в СОЖ в обязательном порядке на обрабатываемом металле или стружке,

образующейся за счет процессов деструкции и окисления. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на влияние разбавления СОЖ, оказываемого на скорость коррозии ( $i_K$  металла). Этот показатель измеряли при погружении плоских компланарных двухэлектродных датчиков из чугуна марки СЧ 18 ХКЧ в объем СОЖ заданной концентрации, приготовленной растворением соответствующего количества концентрата в воде с содержанием солей 4,6 мг-экв/л. Показатель  $i_K$  измеряли через 0,1 ч после погружения металла в объем СОЖ и среднее значение определяли из четырех параллельных измерений.

Зависимость скорости коррозии от концентрации СОЖ (рис. 1) показывает, что до определенной концентрации скорость коррозии изменяется мало и ее значения меньше 0,01 мм/год, а при дальнейшем разбавлении  $i_K$  резко возрастает.



**Рис. 1. Зависимость скорости коррозии от концентрации СОЖ Аквол-14 с различным содержанием ингибитора:**  
**1 - соответственно рецептуре СОЖ; 2 – 50 % этого количества;**  
**3 - без ингибитора**

Было установлено, что концентрация, при которой начинается резкий рост скорости коррозии, зависит от углеродородного состава образца используемого СОЖ. Чем меньше содержание ингибитора  $\text{NaNO}_2$  и др. в составе СОЖ, тем выше эта концентрация. Экспериментально установлено, что в трехпроцентной СОЖ скорости коррозии во всех исследуемых образцах близки по значениям. Таким образом было установлено, что

разница в скоростях коррозии между образцами различного состава проявляется лишь при разбавлении смазочно-охлаждающей жидкости.

Это же явление наблюдалось и при испытании различных видов отечественных и зарубежных СОЖ по ГОСТ 6243-75. При этом в результате адсорбции ингибирующих компонентов СОЖ на стружке и обрабатываемой детали концентрация их в объеме жидкости уменьшается для всех образцов.

В ходе дальнейших исследований коррозия ( $i_K$ ) в образце 1 мало меняется в широком интервале концентраций, и создающееся «разбавление» в условиях ГОСТ 6243-75 не приводит к существенному изменению скорости коррозии. В этом случае образец выдерживает испытание на низкую коррозионную агрессивность. В образцах 2 и 3 в результате «разбавления» скорость коррозии резко возрастает, действия ингибиторов для защиты всей поверхности стружки и обрабатываемой детали не хватает, и на них могут появляться очаги коррозии. Такие образцы, как правило, не выдерживают испытания по ГОСТ 6243-75.

Таким образом, в результате исследований было установлено, что если для измерения скорости коррозии и испытания по ГОСТ 6243-75 брать одну и ту же концентрацию растворов СОЖ (3 %), то нельзя быть уверенными в ожидании корреляции результатов оценки коррозионной агрессивности по двум сравниваемым методам анализа определения  $i_K$ . Поэтому измерения должны проводиться в СОЖ с концентрацией не менее 0,5-1 % мас. При этом образец считается выдержавшим испытание, если значение скорости коррозии через 60 минут после погружения датчика в СОЖ не превышает 0,01 мм/год, а относительная ошибка измерений составляет менее 25 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кисель, А.Г.* Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на стойкость металло-режущего инструмента при токарной обработке / А.Г. Кисель, Д.С. Реченко, А.Ю. Попов, А.А. Ражковский // *Системы, методы, технологии: сб. трудов ОГТУ.* Омск, изд-во: ОГТУ, 2013 г. С. 138-142.
2. *Васильев, А.В.* Снижение негативного воздействия смазывающих охлаждающих жидкостей / А.В. Васильев, Л.Р. Хамидуллова // *Безопасность в техносфере.* 2008. №. 1. С. 40-43.
3. *Кокорин, В.Н.* Применение смазочно-охлаждающих технологических жидкостей в производстве прокатки листового материала: учебное пособие / В.Н. Кокорин, Ю.А. Титов. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 55 с.
4. *Макарова, И.А.* Разработка новых композиций на основе смазочно-охлаждающих жидкостей и углеродных нанотрубок / И.А. Макарова, М. В. Бузаева. Ульяновск, 2016. 122 с.

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВКЛАДЫШЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ**

**А.Р. Агелиев, М.Г. Слободянский**

Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова

*В статье представлены результаты верификации известной аналитической методики прогнозирования долговечности шарниров универсальных шпинделей по критерию износостойкости вкладышей скольжения. Проверка адекватности проводилась путем сопоставления расчетных значений линейного износа и среднего ресурса со значениями, полученными в ходе промышленной эксплуатации универсальных шарниров привода валков профилегобочного агрегата «1-5x300-1650» ЛПЦ-8 ПАО «ММК». Ошибка прогнозирования не превышает 10 %.*

**Ключевые слова:** металлургические машины, шарнир, вкладыш скольжения, линейный износ, средний ресурс, долговечность.

## **ANALYTICAL EVALUATION OF THE UNIVERSAL SPINDLE DEVICES DURABILITY OF METALLURGICAL MACHINES ACCORDING TO THE WEAR RESISTANCE CRITERION IN SLIDING LINERS**

**A.R. Ageliyev, M.G. Slobodianskii**

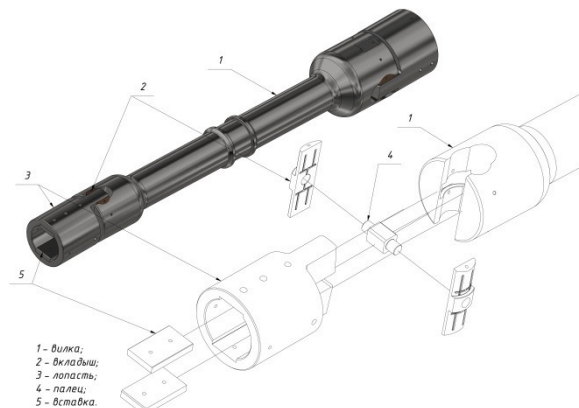
Nosov Magnitogorsk State Technical University

*The article presents the verification results of the well-known analytical method for predicting the universal spindle hinges durability by the wear resistance criterion of sliding liners. The adequacy was checked by comparing the calculated values of linear wear and average life with the values obtained during the commercial operation of the universal joints in the roll drive of the roll forming unit "1-5x300-1650" LPTs-8 PJSC "MMK". The prediction error does not exceed 10 %.*

**Keywords:** metallurgical machines, hinge, sliding insert, linear wear, average resource, durability.



В приводах металлургических машин для передачи крутящего момента широкое распространение получили универсальные шпиндельные устройства, рисунок 1, основной причиной выхода из строя которых является отказ вкладышей скольжения (поз. 2 на рис. 1) по критерию износостойкости.



**Рис. 1. Конструкция универсального шпиндельного устройства**

В данной статье, на примере универсального шпиндельного устройства привода валков профилигибочного агрегата «1-5x300-1650» ЛПЦ-8 ПАО «ММК» проведена верификация известной методики прогнозирования долговечности шарниров с вкладышами скольжения [1], а также представлены результаты промышленной эксплуатации вкладышей, изготовленных из БрАЖН10-4-4.

Исходя из опыта эксплуатации, наибольший износ вкладыша наблюдается в периферийных точках контакта с лопастью 3, где возникают максимальные контактные давления. Уравнение для оценки величины линейного износа  $h_t$  в указанной области согласно методике работы [1] примет вид:

$$h_t = h_0 - \dot{y} \cdot t = h_0 - \frac{\alpha_1^* \cdot v_1 \cdot p_l^{\max} \cdot f_{\text{мех}} \cdot V_{\text{ск}(\max)}}{u_{\epsilon(1)}^*} \cdot t, \quad (1)$$

где  $\alpha_1^* = A_a / A_T$  – коэффициент перекрытия, здесь  $A_a$ ,  $A_T$  – номинальная площадь контакта и площадь трения соответственно [2];

$h_0$  – начальное значение толщины вкладыша в зоне действия максимальных контактных давлений;

$\dot{y}$  - скорость изнашивания вкладыша скольжения;

$V_1$  – коэффициент поглощения внешней энергии (работы сил трения)  $A_{mp}$  поверхностным слоем материала вкладыша, определяемый в функции физических и микрогеометрических характеристик материалов пары трения [2, 3];

$p_{л}^{\max}$  – максимальное значение контактного давления;

$f_{\text{мех}}$  - механическая составляющая коэффициента трения [3, 4];

$V_{\text{ск}(\max)}$  – максимальная скорость скольжения периферийных точек вкладыша по лопасти [4];

$u_{e(1)}^*$  – критическая энергоемкость материалов контактных объемов вкладыша [3 - 4];

$t$  - время непрерывной работы вкладыша.

Для расчета величины линейного износа вкладыша  $h_i$  по методике работы [1] необходима аналитическая оценка максимальных контактных давлений  $p_{л}^{\max}$ . С этой целью проведено компьютерное моделирование напряженного состояния шарнира универсального шпиндельного устройства в системе автоматизированного проектирования Inventor Nastran. Результаты расчета контактных напряжений, для моделируемых условий эксплуатации шарнира, представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Результаты расчета контактных давлений между вкладышем и лопастью шпиндельного устройства**

Результаты сравнительной оценки величин линейного износа и среднего ресурса вкладыша, полученных в ходе промышленной эксплуатации со значениями, рассчитанными по методике работы [1], согласно уравнению (1), представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Результаты оценки линейного износа и среднего ресурса вкладыша скольжения**

Линейный износ вкладыша, мм			Ресурс вкладыша, сут	
Теоретический расчет	Результат промышленной эксплуатации	Ошибка, %	Теоретический расчет	Результат промышленной эксплуатации
5,43	5,1	6,47	869	930

Анализ данных, представленных в таблице, показал, что ошибка прогнозирования линейного износа составляет 6,47 %. Это свидетельствует, на наш взгляд, о приемлемой достоверности результатов расчета и адекватности методики, опубликованной в работе [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анцунов, А.В.* Методика аналитической оценки долговечности шарниров универсальных шпинделей широкополосных станов горячей прокатки по критерию износостойкости вкладышей / А.В. Анцунов, В.П. Анцунов, М.Г. Слободянский, А.В. Анцунов, П.В. Макарова, И.А. Севостьянов // *Производство проката*. 2017. № 11. С. 36-41
2. *Крагельский, И.В.* Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
3. *Анцунов, А.В.* (мл.) Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография / А.В. Анцунов (мл.), А.В. Анцунов, В.П. Анцунов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308с.
4. *Анцунов, А.В.* (мл.) Особенности проектной оценки долговечности деталей машин в условиях много-и малоциклового усталости / А.В. Анцунов (мл.), А.В. Анцунов, В.П. Анцунов и др. // *Механическое оборудование металлургических заводов*, 2014. Вып. 3. С. 40-47.
5. *Анцунов, А.В.* (мл.) Трибодиагностика материалов опорных и рабочих валков листовых станов / А.В. Анцунов (мл.), В.П. Анцунов, М.Г. Слободянский и др. // *Производство проката*. 2008. № 3. С. 41-44.

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАПЕЧАТАННОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Е.И. Елисейкин<sup>1</sup>, Р.Х. Рафиков<sup>1</sup>, В.А. Изотов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЛокоТех», г. Москва

<sup>2</sup>Рыбинский государственный авиационный технический  
университет им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск

*3D-печать наплавлением пластика успешно используется для получения мастер-моделей и пуансонов. В процессе эксплуатации в литейном производстве Ярославского ЭРЗ ранее напечатанных моделей были отмечены их расслоения и деформации. Описан новый способ изготовления износостойких моделей печатью полиамидной оболочки на настольном 3D-принтере без термокамеры и нагрева стола, с дальнейшим заполнением полистиролом и заливкой компаундом.*

**Ключевые слова:** модельная оснастка, 3D-принтер, компаунд, послойное наплавление.

## IMPROVEMENT OF WEAR RESISTANCE OF 3D PRINTED MODEL EQUIPMENT

E.I. Eliseykin<sup>1</sup>, R.Kh. Rafikov<sup>1</sup>, V.A. Izotov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LocoTech LLC, Moscow

<sup>2</sup>Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk

*Fused filament fabrication printing has been successfully used to produce casting models and punches. However, delamination and deformation of printed models were noted in operation process in the Foundry of the Yaroslavl ERZ. The new method for manufacturing wear-resistant models by printing a polyamide shell on a desktop 3D printer without heating chamber and bed, with further polystyrene and compound filling, is described.*

**Keywords:** model equipment, 3D printer, compound, filament fabrication

3D-печать полимерами успешно используется в заготовительном и литейном производствах предприятий России и за рубежом совместно с мехобработкой в изготовлении в наиболее короткий срок выплавляемых и выжигаемых моделей отливок различной геометрии, модельной оснастки для снятия песчано-глинистых и силиконовых форм, а также пуансонов для вакуумной формовки листового пластика [1, 2]. Одной из наи-

более доступной технологии печати, применяемой для моделей и гибких форм, в настоящий момент является послойное наплавление термопластиков (FDM/ FFF), реализованное в 3D-принтерах различными производителями [2]. Наряду с печатью фотополимерами и относительно станочной обработки, преимущество FDM/ FFF-технологии заключается в регулировании внутреннего заполнения изделия путем печати каркаса, что необходимо для снижения затрат времени и расхода материала при получении требуемой прочности. В настоящий момент среди наиболее применяемых материалов в FDM/ FFF-печати, в частности модельной оснастки, остаются филаменты (пластики) ABS, PETG, полистирол HIPS, а для получения запасных зубчатых колес и втулок – полиамид Nylon.

Однако напечатанные модели, также как и полученные мехобработкой, подвергаются износу в процессе эксплуатации. Так, в период 2020 года при эксплуатации в Литейном производстве Ярославского ЭРЗ печатных моделей из ABS и PETG [1] были отмечены деформации и расслоения их поверхностей, возникших в результате вибраций и ударов на набивочной машине в процессе снятия песчаных форм, воздействия разделительной смеси на основе керосина, смол в составе ХТС. Следовательно, возникает потребность в повышении износостойкости моделей. Наиболее простым путем является замена материала печати. В основном, при печати на FDM/ FFF-принтерах, оснащенных нагревом рабочего стола, моделей с габаритными размерами менее 150 на 150 на 150 мм, применяется PETG с коэффициентом усадки 0,7 %, а свыше – PLA с усадкой 0,5 %. Использование температуро- и износостойкого Nylon затруднено, что обусловлено коэффициентом его усадки до 2,5 %, без дополнительных технологических решений приводящей к деформации изделия и его отлипанию от рабочего стола. Данная проблема актуальна также для малогабаритных изделий с внутренним заполнением до 30 %. Основной способ снижения деформации в печати – равномерный нагрев наносимых и нанесенных слоев пластика в термокамере с обдувом горячим воздухом (дополнительно к нагреваемому столу), реализован в промышленных установках, но отсутствует в упрощенных настольных принтерах. Поэтому актуальна возможность печати износостойких моделей из Nylon без термокамеры и нагрева стола на различных типах принтеров.

Для решения вышеуказанной задачи в 2022 году специалистами ООО «ЛокоТех» был разработан и описан новый способ изготовления моделей и изделий [2]. Согласно данному способу были изготовлены опытные призматические образцы – с монтажом блоков полистирола и заливкой двухкомпонентными смолами или полиуретаном холодного отверждения (табл. 1). Для предотвращения деформаций при нагреве полиуретана до 90°C, блоки полистирола предварительно покрывались

компаундом с промежуточной сушкой. Оболочки образцов выполнялись из пластика Nylon от ESUN на «open-build» принтере серии CrealityEnder 5 (без термокамеры), соплом с выходным отверстием  $\varnothing 0,8$  мм. При печати и полимеризации компаундов, расслоения оболочек не отмечено. Далее, по результатам сравнения время затрат на изготовление (см. табл. 1) принято решение о применении полиуретана при заливке.

**Таблица 1. Сравнение трудозатрат на изготовление образцов**

№ образца	Габаритные размеры образца, мм	Габаритные размеры блока	$S$ стенки оболочки, мм	Материал заливки	$t$ изготовления, ч.
1	90 на 90 на 90	60 на 60 на 80	2	Полиуретан KremenCast	3,6
2				Акрил EcoMix	6,2
3				Смола ЭП-20	12,1

В 2022 году на Ярославском ЭРЗ по разработанному способу были получены опытные композитные модели для снятия песчано-глинистых форм чугунных отливок корпуса электропневматических вентилях ВВ-32 и форм из ХТС отливок таблички тепловоза серии ТЭМ31М (рис. 1) [1].



**Рис. 1. Модель и алюминиевая отливка таблички тепловоза ТЭМ31М**

- Основными операциями в изготовлении данных моделей являлись:
- разработать 3D-модель печатаемой оболочки с учетом литейных уклонов и радиусов, усадки Nylon от выбранного производителя;
  - настроить в слайсере параметры печати PLA-подложки и Nylon-оболочки (табл. 2). Выполнить тестовую и основную печать оболочки. В течение процесса основной печати подготовить блок полистирола;
  - отделить оболочку со стола, удалить поддержки и подложку, смонтировать подготовленный блок полистирола;

- залить полиуретаном оболочку. По завершению полимеризации, выполнить контроль геометрии модели на отсутствие деформаций.

**Таблица 2. Параметры печати подложки и оболочки**

Материал печати	$h$ печати первого слоя, мм	$h$ печати основных слоев, мм	$V$ печати первого слоя, мм/с	$V$ печати основных слоев, мм/с	$T$ печати, °С	$S$ стенки оболочки, мм
PLA	0,1	0,1	50	70	215	-
Nylon		0,25	30	60	255	2

Далее, модели были смонтированы на подмоделных плитах и в течение первого полугодия 2022 года успешно апробировались нанесением разделительной смеси, а также снятием полуформ на набивочной машине мод. «Формат-20» с отсутствием расслоений и деформаций за данный период. В настоящий момент, эксплуатация моделей продолжена.

Основываясь на результатах апробации, можно сделать вывод, что разработанный способ позволяет повысить износостойкость моделей без дополнительных затрат времени и необходимости смены технологии изготовления. Таким образом, целесообразным является внедрение способа в литейных производствах других заводов АО «Желдорремаш».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисейкин, Е.И.* Изготовление деталей и узлов тягового подвижного состава с применением технологий 3D-печати в условиях сервисных и локомотиворемонтных предприятий / Е.И. Елисейкин, Р.Х. Рафиков, В.А. Изотов, М.В. Канищев, Г.А. Гелашвили // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXXI Всероссийской науч.-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. С. 38-42.
2. *Елисейкин, Е.И.* Изготовление элементов модельной оснастки комбинированным способом с применением FDM/FFF 3D-печати и двухкомпонентных компаундов/ Е.И. Елисейкин, А.С. Гуляев, Р.Х. Рафиков // Г12 «Гагаринские чтения – 2022»: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ, 2022.

## ОБ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ КОМПОНЕНТОВ ЛОКОМОТИВОВ

**Р.Х. Рафиков<sup>1</sup>, С.А. Горovenko<sup>2</sup>, Г.А. Гелашвили<sup>3</sup>, М.А. Сивов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), г. Москва

<sup>2</sup> ООО WaveScan, г. Ярославль

<sup>3</sup> ООО ЯрЧПУ, г. Ярославль

<sup>4</sup> ООО «Диагностика», г. Ярославль

*Анализ конструкторской документации показал, что в конструкции абсолютно всех локомотивов, присутствуют изделия иностранного производства. Отмечено, что, в изделиях отечественного производства, зачастую содержатся компоненты также иностранного производства. Изложенная ситуация имеет объективные причины, обусловленные отсутствием отечественных аналогов многих изделий иностранного происхождения. Предложены меры по обеспечению производства комплектующими в разрезе конкретных изделий по предлагаемым сценариям.*

**Ключевые слова:** анализ, конструкторская документация, комплектующие, локомотивы, импортозамещение

## ON IMPORT SUBSTITUTION OF COMPONENTS LOCOMOTIVES

**R.H. Rafikov<sup>1</sup>, S.A. Gorovenko<sup>2</sup>, G.A. Gelashvili<sup>3</sup>, M.A. Sivov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow

<sup>2</sup> LLC WaveScan, Yaroslavl

<sup>3</sup> LLC YarCNC, Yaroslavl

<sup>4</sup> LLC Diagnostics, Yaroslavl

*An analysis of the design documentation showed that the design of absolutely all locomotives contains foreign-made products. It is noted that, in products of domestic production, components also often contain foreign production. The above situation has objective reasons due to the lack of domestic analogues of many products of foreign origin. Measures are proposed to ensure the production of components in the context of specific products according to the proposed scenarios.*

**Keywords:** analysis, design documentation, components, locomotives, import substitution



На основании анализа конструкторской документации [1, 2] и представленных локомотивостроительными холдингами материалов мы видим, что в конструкции абсолютно всех локомотивов, присутствуют изделия иностранного, в том числе американского и западноевропейского производства.

В частности:

- более 20 наименований деталей и узлов дизелей типа Д49, в числе которых такие ключевые компоненты как блок цилиндров, коленчатый вал, турбокомпрессор, шатуны, системы управления подачей топлива, автоматические фильтры масла;

- более 10 ключевых электрических аппаратов, включая тяговые трансформаторы электровозов 2(3,4)ЭС5К и ЭП1М, которые изготавливаются в республике Беларусь, но с широким использованием украинских комплектующих (ПАО «Укрэлектрораппарат» г. Хмельницкий);

- 280 позиций электроники и электрокоммутационных изделий, в числе которых бортовые компьютеры Gersys (Германия), компоненты выпрямительных установок электровозов переменного тока, компоненты тяговых преобразователей, пультов управления, аппаратных камер.

- более 20 видов подшипников, в том числе такие критические позиции, как моторно-осевые подшипники электровозов 2(3,4)ЭС5К производства Shaeffler Gruppe (Германия), моторно-осевые подшипники тепловозов 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М производства SKF (Швеция), буксовые кассетные подшипники электровозов 2ЭС6 производства SKF (Италия) и ЭП20 производства FAG (Германия).

- автотормозное оборудование, в том числе компрессоры тепловозов 3ТЭ25К2М производства Кнорр-Бремзе (Германия) и ТЭМ18ДМ производства Полтавского ТМЗ (Украина).

Кроме того, в изделиях отечественного производства, приобретаемых локомотивостроительными заводами у российских поставщиков, зачастую содержатся компоненты иностранного производства. В качестве примера приведем винтовые компрессорные агрегаты серии АКВ, устанавливаемые на электровозы ЭП2К и 2ЭС6, тепловозы 2ТЭ25КМ и ТЭП70. Производителем является АО «Транспневматика», г. Первомайск, но в конструкции используется винтовой модуль производства ФРГ.

Аналогичная ситуация по многим электронным компонентам. Например, новый электровоз 2(3)ЭС8 производства [3] ООО «Уральские локомотивы», который декларируется как максимально импортозамещенный, содержит импортные (немецкие) IGBT транзисторы [4], которые изготавливают всего 3 компании в мире. Электронные компоненты и

микропроцессоры, используемые в системах управления локомотива, китайского, западно-европейского, американского производства.

Изложенная ситуация имеет объективные причины, обусловленные отсутствием отечественных аналогов многих изделий иностранного происхождения, в первую очередь изделий точной механики (ряд серий подшипников, компоненты винтовых компрессоров), полупроводниковой и микропроцессорной техники. В этой связи необходимо четко понимать пути обеспечения этими компонентами производства и сервисного обслуживания локомотивов.

Предложены меры [5] по обеспечению производства комплектующими в разрезе конкретных изделий по следующим сценариям:

- замена импортных изделий на отечественные аналоги;
- замена изделий, произведенных в недружественных к России странах на их аналоги из дружественных стран;
- поиск альтернативных каналов поставки изделий, производимых в недружественных странах;
- перечень узлов и деталей локомотивов импортного происхождения разослан в адрес машиностроителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рафигов, Р.Х. Технологическая подготовка производства при освоении ремонта локомотивов / Р.Х. Рафигов, М.Ю. Куликов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2022. № 102. Рафигов, Р.Х. Порядок постановки на производство локомотивов и их составных частей, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», машиностроительными предприятиями (ремонтными) с целью установления им нового назначенного срока службы // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 9.
3. Электровоз «Малахит»: сверхмощность для горного рельефа и сложного климата // Гудок. URL: <https://gudok.ru/content/mechengineering/1597246/>.
4. Insulated Gate Bipolar Transistor // Fairchild. URL: <https://datasheet.octopart.com/J300-Fairchild-datasheet-18757.pdf>.
5. Рафигов, Р.Х. Технологическая подготовка сервисных локомотивных депо при ТОиР локомотивов // *Вестник транспорта Приволжья*. 2022. № 8.

## **ОПТИМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Н.А. Ляпичев, Э.Р. Халилов, Н.Е. Садковская**

Московский авиационный институт (НИУ)

*Статья посвящена оптимальным методам, используемым в целях качественной и своевременной диагностики и последующему планированию ресурсопотребления в условиях различных производственных и эксплуатационных ограничений, на современных предприятиях машиностроения.*

**Ключевые слова:** информационная система, машинное обучение, математическое моделирование, модель «дерево решений», методы случайного леса.

## **BEST MODELING TECHNIQUES UNDER VARIOUS RE- STRICTIONS AT THE ENTERPRISES OF MECHANICAL EN- GINEERING**

**N.A. Lyapichev, E.R. Khalilov, N.E. Sadkovskaya**

Moscow Aviation Institute (NRU)

The article is devoted to the optimal methods used for high-quality and timely diagnostics and subsequent planning of resource consumption under various production and operational restrictions at modern engineering enterprises.

**Keywords:** Information system, machine learning, mathematical modeling, decision tree model, random forest methods.

Внедрение и дальнейшее использование современных информационных технологий в различные сферы машиностроения приводит к возникновению сложных взаимосвязей между элементами информационной среды. Применение математических методов в отрасли машиностроения является одним из наиболее перспективных направлений синергии научного знания, что делает их особенно актуальными в современных условиях развития экономики и производства. Рассмотрим основные классы информационных систем.

Информационные системы, их программные средства и базы данных условно делятся на два крупных класса:

1. Информационные системы, в которых осуществляется накопление, обработка и хранение информации полученной из внешней среды с активным участием пользователей. Для данного класса систем должна обеспечиваться высокая конфиденциальность, целостность и доступность данных потребителям, что отражается требованиями к высокой информационной безопасности. Примерами таких систем являются системы класса MES (manufacturing execution system) и ERP (Enterprise Resource Planning);

2. Информационные системы в программное и математическое обеспечение которых включаются компоненты для управления и обработки информации в режиме, близкому к реальному времени, основные задачи которых состоят в обеспечении достоверной реализации эффективного и устойчивого управления при относительно малом участии пользователей в их решении.

Регрессионный и сегрегационный анализ широко используются для количественного прогнозирования поведения зависимых переменных при изменении влияющих факторов, что позволяет оценить важность общих переменных в производственном процессе.

Закон корреляции — один из современных универсальных подходов, позволяющий обнаруживать связанные события, порождающие закономерность.

Применение методов машинного обучения с использованием деревьев решений позволяет осуществить моделирование производственных и социально-экономических характеристик, выявить зависимость между переменными для различных типов данных.

Особую актуальность имеет выявление проблем нехватки ресурсов и их решения с использованием методов интеллектуального анализа данных. С помощью компьютерного моделирования можно оптимизировать стратегии управления в развитии наукоемких организаций.

Модель дерева решений позволяет классифицировать будущие наблюдения на основе набора правил принятия решений. Использование деревьев решений ограничено невозможностью найти наилучшее правило (наиболее полное и точное). Для установления основных правил и расчета веса в последнее время часто используются две концепции:

Баггинг (bagging – bootstrap aggregation): обучение базовых правил происходит на различных случайных подвыборках данных или/и на различных случайных частях признакового описания; при этом базовые правила строятся независимо друг от друга.

Бустинг (boosting): каждое следующее базовое правило строится с использованием информации об ошибках предыдущих правил, а именно, веса объектов обучающей выборки подстраиваются таким образом, чтобы новое правило точнее работало на тех объектах, на которых предыдущие правила чаще ошибались. Эксперименты показывают, что, как правило, бустинг работает на больших обучающих выборках, тогда как баггинг – на малых.

Одной из реализаций идеи баггинга является случайный лес.

Одной из модификаций метода случайных деревьев является алгоритм крайне случайных деревьев (extremely random forests), в котором на каждом этапе для выбора признака, по которому будет проводиться разбиение, используется вновь сгенерированная случайная бутстрэп-выборка.

Общая схема обучения модели показана на рисунке 1 и включает в себя несколько ключевых этапов:

- Кодировку характеристик
- Выбор гиперпараметров модели
- Выбор модели, выбор лучшей модели из получившихся.

Оценка модели осуществляется при помощи отчета ожидания – факт, пример отчета предоставлен в таблице 1.

**Таблица 1. Оценка модели**

Сегмент (бал)	Факт, %	Ожидание, %
<100	7	8
100-250	8	9
250-500	9	9
>500	10	10

Среди достоинств алгоритма случайных деревьев можно выделить высокое качество предсказания, способность эффективно обрабатывать данные с большим числом классов и признаков, внутреннюю оценку обобщающей способности модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование информационных систем // ИНТУИТ Национальный Открытый Университет. URL: <https://intuit.ru/studies/courses/2195/55/info> (дата обращения: 15.05.2020).
2. *Избачков, Ю.С.* Информационные системы. / Ю.С. Избачков, В.Н. Петров. 2-е изд. СПб: Питер, 2006. 656 с.
3. Brett Lantz Machine Learning with R. Birmingham: Packt Publishing, 2013. 396 с.
4. *Шитиков, В.К.* Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. / В.К. Шитиков, С.Э. Мاستицкий. Тольятти: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 07.04.2017. 115 с.

## ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Р.О. Мазуркевич, Н.Е. Садковская**

Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)

*Применение 3D технологий позволяет не только повысить эффективность, производимой продукции, но и позволяет сократить время производства и стоимость. Данное направление является перспективным для развития. На сегодняшний день очень много российских промышленных предприятий проводят интеграцию 3D принтеров.*

**Ключевые слова:** 3D печать в промышленности, Преимущества 3D печати, 3D технологии.

## TECHNOLOGIES OF 3D PRINTING IN ENGINEERING

**R.O. Mazurkevich, N.E. Sadkovskaya**

Moscow Aviation Institute (National Research University)

*The use of 3D technologies not only improves the efficiency of manufactured products, but also reduces production time and cost. This direction is promising for development. Today, a lot of Russian industrial enterprises are integrating 3D printers.*

**Keywords:** 3D printing in industry, Benefits of 3D printing, 3D technology.

В производстве машин и оборудования мы все чаще используем технологии, направленные на создание изделий высокой сложности и высокого качества. Так как происходит постоянная конкуренция за потребителя.

Одной из таких технологий является 3D принтер, который уже очень активно используется во многих сферах производства. Примером может служить активный интерес российских промышленных предприятий к внедрению инновационных 3D-решений в свои производственные цепочки.

Перспективной сферой применения 3D технологий является отрасль машиностроения. В данной отрасли есть большая потребность в разработке и создании новейшего оборудования с применением передовых решений. 3D технологии постоянно проходят всестороннее совер-

шенствование, что привит к повышению эффективности процесса создания изделия, сокращению производственного времени и повышению сложности и качества производимой продукции. Также происходит существенное сокращение ресурсных затрат на единицу продукции, что приводит к снижению себестоимости, а это в свою очередь повышает прибыль.

Преимущества применения 3D-печати в машиностроении:

1. Возможность изготовления изделия высокой геометрической сложности, что имеет большие преимущества перед традиционными методами производства;
2. Повышение точности и прочности изделия, за счет использования сверхтонких стенок, внутренних каналов и бионических структур, что также снижает вес детали;
3. Сокращение времени и стоимости изготовления одной детали;
4. Повышение рентабельности производства мелкосерийных и заказных изделий;
5. Возможность внесения корректировок в модель детали даже на заключительных стадиях разработки, что снижает вероятность дефектов при первоначальном проектировании;
6. Управление физико-механическими свойствами изделия за счет использования высокотехнологичных материалов.

3D печать в машиностроении подходит для решения следующих задач:

1. Прототипирование и функциональное тестирование;
2. Проверка конструкции детали путем производства технических прототипов;
3. Проведение технологических экспериментов с созданными образцами изделия;
4. Проверка деталей на эргономичность;
5. Производство мастер-моделей для литья, в том числе по выплавляемым и выжигаемым моделям;
6. Быстрое производство оснастки;
7. Производство формообразующих элементов пресс-форм для литья термопластов и легких материалов;
8. Производство функциональных деталей для разнообразных агрегатов и узлов;
9. Возможность производства цельных деталей, исключая этап отдельной сборки.

Существуют следующие технологии 3D-печати для машиностроительных предприятий:

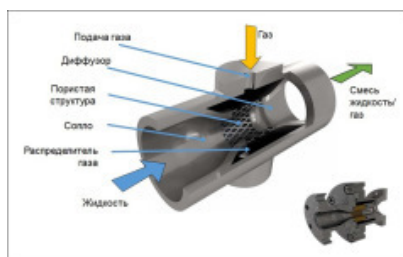
1. Selective Laser Melting (Селективное лазерное плавление (SLM));



2. Stereolithography Apparatus (Лазерная стереолитография (SLA));
3. Selective Laser Sintering (Селективное лазерное спекание (SLS));
4. Fused Deposition Modeling (Моделирование методом послойного наплавления (FDM));
5. Multi Jet Modeling (Многоструйная печать (MJP));
6. Color Jet Printing (Полноцветная струйная печать (CJP)).

Применение 3D принтеров в машиностроении должно не только увеличить темп развития отрасли, но также повысить производственную эффективность, что в свою очередь позволит вывести российские предприятия на совершенно другой уровень.

Это подтверждается на примере компании Jures. Они смогли разработать и успешно создать модернизированный смеситель жидкости с газом (рис. 1). Традиционно данное изделие производилось из 12 отдельных частей, которые включали 3 крупных элемента. 1 это фланцевые корпусные соединения, 2 это вставка смесителя. С помощью применения 3D-технологий стало возможным производство единого корпуса, вместо сборного, состоящего из 12 деталей. Также отпала необходимость в использовании нескольких видов металлов и фланцевых соединений: внутри цельнометаллического корпуса просто нарезается резьба, благодаря чему вес смесителя уменьшился с 1,3 кг до 50 г. В два раза сократилось время производства. И наконец, финансовые затраты на производство уменьшились на 73 %.



**Рис. 1. Схема цельнометаллического смесителя, созданного по SLM-технологии. Справа внизу: изначальная модель, состоящая из 12 элементов**

Несмотря на то, что применение 3D-печати есть очень много преимуществ, в нем также есть и недостатки. Например, можно выделить высокую стоимость самого оборудования и материалов, отсутствие глубоких знаний в области 3D-моделирования, дефицит высококвалифицированных специалистов, и самый большой недостаток – это проблемы с интеграцией в уже устоявшиеся, традиционные технологические цепочки

на предприятии. Сегодня аддитивные методы производства еще не в состоянии полностью сменить используемые технологические методы производства, но они уже доказали экономическую выгоду при использовании в прототипировании и мелкосерийном производстве и являются наилучшим подходом при реализации небольших и сложных изделий.

В итоге, использование и внедрение 3D-технологий позволяет увеличить скорость производства и эффективность выпускаемых изделий, и как следствие увеличивает конкурентоспособность машиностроительных предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3D-принтеры в машиностроении // Globatek.3D URL: <https://3d.globatek.ru/3d-printers/machinery/> (дата обращения: 16.05.2022).
2. Выставка Rosmould // Rosmould URL: <https://rosmold.ru/> (дата обращения: 16.05.2022).
3. Аддитивные технологии и 3D-сканирование в машиностроении: 7 историй успеха // iQB technologies URL: <https://blog.iqb.ru/3d-technologies-in-machine-industry/> (дата обращения: 16.05.2022).
4. *Муленко, В.В.* Компьютерные технологии и автоматизированные системы в машиностроении.: автореф. дис. к.т.н. инж. наук: 27.04.01. М, 2015. 73 с.

## О ПОВЫШЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

В.Г. Лисичкин<sup>1</sup>, Н.В. Лисичкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Академия ФСО России, г. Орёл

<sup>2</sup> Орловский государственный университет экономики и торговли, г.  
Орёл

*Статья посвящена исследованиям в области оценки фазовых сдвигов при вихретоковом контроле резонансными методами в условиях случайного воздействия помех. Выполнены аналитические исследования процессов, направленных на увеличение достоверности неразрушающего контроля толщины покрытий за счет снижения погрешности резонансных измерений. Определены возможные пути получения высокой точности измерений при условии обеспечения достаточного превышения сигнала над шумами.*

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, фазовый сдвиг, точность измерений.

## ABOUT INCREASING RELIABILITY EDDY CURRENT CONTROL

V.G. Lisichkin<sup>1</sup>, N.V. Lisichkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Academy of FSO (Federal Protect (Guard) Service), Orel

<sup>2</sup> Orel State University of Economics and Trade, Orel

*The Article is devoted researches in the field of phase shifts estimation at whirl current control by resonant methods in the conditions of hindrances casual influence. Analytical researches of the processes directed on increase of not destroying control of coverings thickness at the expense of error measurements decrease are executed. Possible ways of split-hair accuracy measurements reception under condition of sufficient excess maintenance of a measuring signal over noise are defined.*

**Keywords:** whirl current control, phase shift, measurement accuracy.

Современные тенденции экономического развития характеризуются повышением требований к технологическим производственным процессам в машиностроении, выполнение которых невозможно без проведения высокоточных измерений параметров, характеризующих качество выпускаемой продукции. Одним из актуальных направлений совершен-

ствования системы управления качеством в цифровом машиностроении является разработка высокочастотных приборов контроля с индуктивными или емкостными измерительными преобразователями, применение которых базируется на использовании в качестве средства измерения явления резонанса в электрических цепях. Реализация резонансных частотных методов контроля в большинстве практических случаев сводится к возбуждению первичного измерительного преобразователя с индуктивным или емкостным датчиком высокочастотным сигналом и последующему измерению амплитудных и фазочастотных параметров выходного сигнала измерительного преобразователя, изменившихся под влиянием свойств контролируемых материалов и изделий [1].

Особенную важность для машиностроительного производства имеет контроль качества защитных покрытий, предохраняющих от коррозии как отдельные детали и сборочные узлы, так и готовые изделия. При изготовлении многих видов цифрового оборудования требования к качеству покрытия существенно возрастают, поскольку от равномерности и толщины слоя зависит не только срок эксплуатации изделия, но и обеспечение стабильности электрических параметров. Неразрушающий контроль толщины покрытий различных материалов выполняется, в основном, вихретоковыми резонансными методами, которые реализуются с помощью измерения амплитудно-фазовых характеристик высокочастотного сигнала, снимаемого с первичного измерительного преобразователя с индуктивным датчиком в своем составе.

Активные потери в вихретоковом преобразователе, являющемся элементом резонансной измерительной системы, заметно уменьшают точность измерений, основанных на амплитудных зависимостях, так как при уменьшении добротности резонансная кривая становится пологой и момент наступления резонанса определяется с большой погрешностью. Для устранения этого эффекта необходимы технические решения, основанные на иных принципах достижения баланса, связанных не с амплитудными, а с фазовыми характеристиками, что позволит существенно повысить достоверность измерений [2].

Фазовые измерения проводятся в условиях воздействия различного рода помех  $n(t)$ , имеющих в большинстве своем стохастический характер. Задачу оценки фазового сдвига можно сформулировать следующим образом. По наблюдаемой реализации случайного процесса  $y(t)$ , являющейся смесью полезного сигнала  $s(t, \theta)$  и шума:

$$y(t) = s(t, \theta) + n(t),$$

Определить наилучшим образом (в смысле выбранного критерия), какое конкретное значение принял измеряемый параметр  $\theta$  в этой реализации на интервале наблюдения  $(0, T)$ . Предполагается, что все парамет-

ры, кроме измеряемого, известны, сам измеряемый параметр на интервале наблюдения постоянен, а длительность интервала наблюдения позволяет набрать достаточную статистику измерений.

Известно [2, 3], что получение наилучшей оценки фазы при реализации вероятно – статистического подхода основано на вычислении максимума апостериорной плотности вероятности  $W[\theta / y(t)]$ .

$$W[\theta / y(t)] = \frac{W(\theta) \cdot W[y(t) / \theta]}{W[y(t)]} \Rightarrow \max . \quad (1)$$

Если эта функция известна или есть возможность ее вычислить с достаточной степенью точности, то такое измерение фазы дает наилучший результат, так как в этом случае получается несмещенная и эффективная оценка. Если точность измерения все же недостаточна, можно увеличить число наблюдаемых реализаций  $y(t)$ . При этом действует известный принцип накопления [3]: если наблюдения независимы и условные плотности вероятностей  $W[y(t) / \theta]$ , соответствующие отдельным наблюдениям, теоретически различаются, вероятность ошибки при многократном повторении измерений можно сделать сколь угодно малой.

При введении функции потерь для учета последствий различного рода ошибок, возникающих при осуществлении измерений, переходят к более общему виду критерия (1) – минимального среднего риска или байесовскому. Этот критерий, как и предыдущий, позволяет получить оптимальную оценку и его использование также требует полной априорной информации. При введении достаточно простой функции потерь, например, квадратичной функции

$$C(\hat{\theta}, \theta) = (\hat{\theta} - \theta)^2 ,$$

где  $\hat{\theta}$  – результат измерения фазового сдвига (искомая оценка фазы), решающее правило будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{r} = M\{(\hat{\theta} - \theta)^2 / y(t)\} \Rightarrow \min , \quad (2)$$

где  $\bar{r}$  – средний риск от принятия неправильного решения;  $M\{\}$  – математическое ожидание.

В этом случае оценка фазы будет несмещенной, эффективной и численно равной апостериорному математическому ожиданию оцениваемой величины:

$$\hat{\theta}_{\text{опт}} = M[\theta / y(t)].$$

Получение оптимальной оценки фазы по критериям (1), (2) связано с необходимостью знать всю априорную информацию о наблюдаемом процессе. Это функции плотности вероятности  $W(\theta)$  измеряемого параметра и реализации случайного процесса  $W[y(t)]$ , а также условная плотность вероятности  $W[y(t) / \theta]$ . В большинстве практических случаев это является затруднительным, поэтому от апостериорной плотности  $W[\theta / y(t)]$  или среднего риска  $\bar{r}$  переходят к другим функциям, внося в решающие правила (1) или (2) ряд субъективных прагматических требований или условий [4].

При осуществлении неразрушающего контроля толщины покрытий различных материалов вихретоковыми методами с помощью резонансного измерительного преобразователя большое значение имеет достижение высокой точности измерений выходного параметра, в качестве которого выступает фазовый сдвиг между сигналом высокостабильного опорного генератора и напряжением на нагрузочном контуре. Поскольку измерения проводятся в условиях воздействия множества случайных факторов, наилучшие результаты дает вероятностно – статистический подход с использованием оптимальных схем. Оптимальные схемы, реализующие байесовские оценки в общем случае, или основанные на критерии максимума функции правдоподобия в случае нормальных шумов, дают возможность получить несмещенную и эффективную оценку фазового сдвига с минимально возможной погрешностью.

Построение оптимальных схем требует полной априорной информации о наблюдаемом процессе и точного выполнения измерительного тракта, что в большинстве практических ситуаций нереализуемо. Вполне приемлемую точность могут дать в этом случае квазиоптимальные измерительные устройства, если обеспечить достаточное превышение полезного сигнала над шумами. Основными источниками шумов при вихретоковых измерениях являются активные элементы резонансной измерительной системы, поэтому предпосылкой реализации квазиоптимальных измерителей фазы может стать обеспечение микромощного режима работы для получения необходимого соотношения  $P_c / P_{\text{ш}}$ . Это позволит обеспечить требуемую точность измерения фазовых сдвигов и увеличить таким образом достоверность контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ари, Э.С. Автогенераторные измерения. М.: Энергия, 1976. 136 с.

2. *Тихонов, В.И.* Статистическая радиотехника. М. : Радио и связь, 1982. 624 с.
3. *Крамер, Р.* Математические методы статистики / Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 648 с.
4. *Лисичкин, В.Г.* Модель оценки влияния полноты измерений на достоверность контроля параметров окружающей среды // *Научные записки ОрелГИЭТ.* 2016. №. 6(18). С. 70-80.
5. *Ван Трис, Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Сов. Радио, 1972. 744 с.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЦЕНТРОВ**

**О.С. Ломова**

Омский институт водного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Сибирский  
государственный университет водного транспорта»

*Приведены результаты исследований определения точности круглошлифовального станка методом неразрушающего контроля. Экспериментальные зависимости амплитуды ультразвуковых колебаний от угла перекоса осей центров при изменении площади их опорной поверхности в центровом отверстии позволяют производить входной контроль геометрической точности круглошлифовальных станков перед обработкой партии заготовок другого типоразмера.*

**Ключевые слова:** круглошлифовальный станок, ультразвуковой контроль, площадь опорной поверхности центра, центровое отверстие, ультразвук, площадь опорной поверхности.

## **OPTIMIZATION OF ROUND GRINDING BY NON-DESTRUCTIVE CHECK OF CENTRE ALIGNMENT**

**O.S. Lomova**

Omsk Institute of Water Transport - branch of FSBEI HE Siberian State University of Water Transport

*The paper results of studies of determining the accuracy of the centers of the round grinding machine by non-destructive testing are given. Experimental dependence of amplitude of ultrasonic oscillations on angle of centre axes distortion at change of area of their bearing surface in centre hole allows to perform input control of geometrical accuracy of round grinding machines before processing batch of billets of other size.*

**Keywords:** cylindrical grinding machine, ultrasonic inspection, area of center support surface, center hole, the ultrasound, the bearing surface.

Точность круглошлифовальных станков регламентирована стандартом ГОСТ 11654-90, предусматривающего поверку соосности отверстий шпинделя передней и задней бабок, осевого и радиального биения

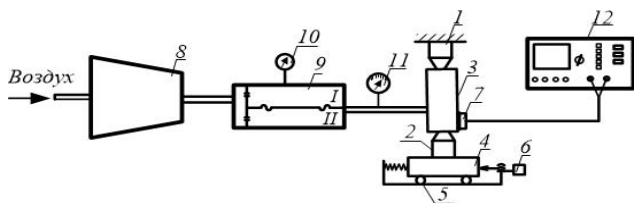


отверстий для установки центров. Методы проверок трудоёмки, предполагают создание измерительного комплекса, поэтому проводятся только при плановом ремонте станков и не используются в ходе технологического процесса.

Для обнаружения дефектов в материалах успешно применяют ультразвуковой неразрушающий контроль [1, 2]. Успехи в области теории колебаний позволяют применять этот метод для контроля расположения сопрягаемых разъемных соединений, которые условно можно принять неразъемными, если к ним предъявляются требования постоянной жесткости номинального сопряжения и точности позиционирования [3].

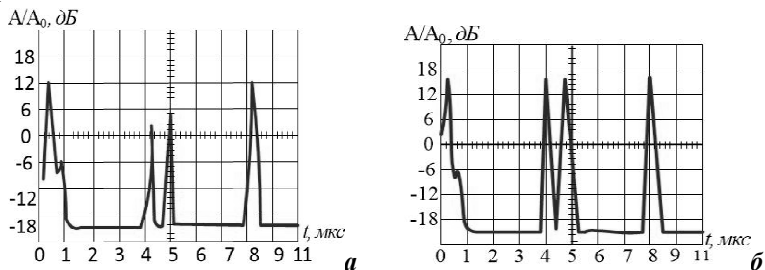
Контакт сопрягаемых тел характеризуется давлением, площадью опорной поверхности и другими параметрами [4]. За критерий точности круглошлифовального станка можно принять площадь опорной поверхности центра и центрального отверстия заготовки, изменение которой можно контролировать ультразвуком [5]. Импульс, проходящий через заготовку и центр, в случае неплотного их прилегания будет отражаться от воздушного зазора, причем максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний будет соответствовать соосности центров.

Экспериментальные исследования точности круглошлифовального станка по изменению площади опорной поверхности центров Морзе исполнения 4 проведены на разработанном стенде, включающем заготовку, дефектоскоп с диапазоном толщин контролируемого материала от 1 до 999 мм, пьезоэлектрический датчик (ПЭП), узел очистки и подачи сжатого воздуха, узел контроля давления с пневматическим преобразователем, индикатор и манометр. В экспериментах для ультразвукового сканирования контакта центра и заготовки использовали ПЭП наклонного типа с углом  $60^\circ$ . В центры соосно устанавливали заготовку по показаниям манометра и пневматического преобразователя. Для этого в её центральных отверстиях были изготовлены каналы, к которым подключалась измерительная ветвь пневматического преобразователя с конической иглой. В центральном отверстии подачей воздуха поддерживалось рабочее давление (рис. 1).



**Рис. 1.** Стенд: 1, 2 – центры; 3 – заготовка; 4 – каретка; 5 – направляющие; 6 – микровинт; 7 – ПЭП; 8 – компрессор; 9 – преобразователь; 10 – индикатор; 11 – манометр; 12 – дефектоскоп

Эксперимент предусматривал возможность смещения подвижного центра с помощью каретки и микровинта. При этом жесткость номинального сопряжения центра и заготовки менялась, давление в цепи падало из-за истечения воздуха через образовавшийся зазор  $Z$ . Изменение давления фиксировали от величины зазора по показаниям пневматического преобразователя. Зависимости ультразвуковых колебаний представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимости ультразвуковых колебаний  $A/A_0$  от времени прохождения импульса  $t$ : а – при максимальной площади ОП (соосность центров); б – при минимальной площади ОП (зазор  $Z = 98$  мкм)

Математическим методом были найдены изменения угла перекоса осей центров  $\alpha$  от величины ультразвуковых колебаний. Зазор центра и центрального отверстия определялся в соответствии с уравнением И.Н. Ермолова [5] с учетом амплитуды ультразвуковых волн. Также была найдена площадь опорной поверхности центра (сталь 40Х) и заготовки (сталь 40ХН) через ультразвуковые колебания  $A/A_0$ :

$$S_{on} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot \lg \left( \left\langle \frac{A}{A_0} \right\rangle \right). \quad (1)$$

Погрешность формы заготовок во многом определяется прецессией их оси вращения, зависящей от угла перекоса осей центров  $\alpha$ , значение

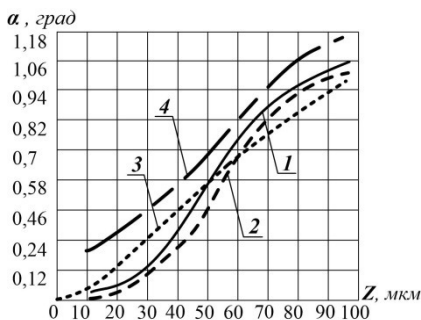
которого связано с площадью опорной поверхности центра, а значит и с амплитудой ультразвуковых колебаний. С этой целью были выполнены теоретические исследования по определению  $\alpha$  от изменения величины  $Z$  и  $A/A_0$ . Окончательно зависимость  $\alpha$  от  $Z$  будет равна:

$$\alpha = \text{arctg} \left( \frac{4h}{3Z} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \text{ град} \quad (2)$$

Выразим  $Z$  через площадь опорной поверхности и с учетом отношений  $A/A_0$  получим изменение угла перекоса осей центров  $\alpha$ :

$$\alpha = \text{arctg} \left( \frac{4h}{3 \cdot \left( D - \sqrt{10,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{A}{A_0}} \right)} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \quad (3)$$

Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей показали хорошую сходимость (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимости  $\alpha$  от  $Z$ : 1, 2 – экспериментальные исследования смещении центра (прямой и обратный ход); 3 – теоретическая зависимость; 4 – угловое смещение центра

Ультразвуковой контроль целесообразно использовать как входной контроль геометрической точности круглошлифовальных станков перед обработкой новой партии заготовок другого типоразмера. Для этого следует установить оправку с акустическим преобразователем в центры станка. Если по показаниям амплитуд колебаний площадь опорной поверхности максимальна, значит центры сосны, конусные опорные поверхности баз не искажены износом и погрешность базирования отсутствует.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешин, Н.П.* Ультразвуковая дефектоскопия: справочное пособие / Н. П. Алешин, В.Г. Лупачев. Минск, Выс. школа, 1987. 271 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник : в 2-х кн. / А.С. Боровиков и др.; кн. 1 / под ред. В.В. Ключева. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1986. 487 с.
3. *Ломова, О.С.* Зависимость точности обработки деталей от характера контактирования центра и центрального отверстия / О.С. Ломова, И.А. Сорокина // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2011. №1(8). С. 67 – 70.
4. *Моргунов, А.П.* Разработка и обеспечение прочности профилейных неподвижных неразъемных соединений: монография. М.: Технология машиностроения, 2009. 246 с.
5. *Ермолов, И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.