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

№ 2(22)
2021

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2021» (6 – 10 сентября 2021 года)*

Севастополь 2021

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – РОЩУПКИН С.И.

Научный редактор

к.т.н., проф. ХАРЧЕНКО А.О.

Отв. секретарь

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШОВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Обоснование существования минимальной энергоемкости оптимального управления движением объекта	4
Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Исследование эксплуатационной надежности резьбонарезных станочных модулей.....	9
Дударев А.С. Перспективы алмазно-абразивного инструмента для сверления и фрезерования полимерных композиционных материалов.....	17
Братан С.М., Новоселов Ю.К., Стадник Т.В., Часовитина А.С. Влияние технологических режимов на тангенциальную составляющую силы резания при ленточном ротационном шлифовании заготовок из титанового сплава ВТЗ-1.....	19
Умеров Э.Д. Анализ математических моделей при моделировании процесса сверления.....	27
Харченко А.О., Харченко А.А., Часовитина А.С. Механизмы параллельных структур (МПС) в гибридных компоновках резьбонарезного оборудования.....	33

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

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.	
Associate Editor in Chief Ph.D., Associate Prof – ROSCHUPKIN S.I.	
Scientific Editor Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.	
Executive Secretary D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.	
Editorial team	
ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc.Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Ryzhkov A.I. Existence justification of the minimum energy capacity for the object motion optimal control	4
Kharchenko A.O., Kharchenko A.A., Vladetskaya E.A. Operational reliability study threading machine moules.....	9
Dudarev A.S. Prospects of diamond-abrasive tools for drilling and milling of polymer composite materi- als.....	17
Bratan S.M., Novoselov Yu.K., Stadnik T.V., Chasovitina A.S. The influence of technological modes on the tangential component of the cutting force during belt rotary grinding of blanks made of titanium alloy VT3-1.....	22
Umerov E.D. Analysis of mathematical models in modeling the drilling process.....	27
Kharchenko A.O., Kharchenko A.A., Chasovitina A. S. Mechanisms of parallel structures (MPS) in hy- brid lines of threading equipment.....	33

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 519.3:05.011.56:621.865.8

ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТА

А.И. Бохонский¹, Н.И. Варминская², А.И. Рыжков¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация² ФГКОУ ВПО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Показано, что при обобщении задачи Лагранжа об оптимальном управлении (ускорении) типа «разгон-торможение» перемещением объекта из исходного в конечное состояние покоя (при заданном времени движения и расстоянии) существует предельно возможная энергия управления для достижения цели движения. Дано сравнение результатов с известными из теории оптимального управления.

Ключевые слова: задача Лагранжа, вариационный метод, «разгон-торможение», цель движения, конструирование управления, минимальная энергоёмкость.

EXISTENCE JUSTIFICATION OF THE MINIMUM ENERGY CAPACITY FOR THE OBJECT MOTION OPTIMAL CONTROL

A.I. Bokhonsky¹, N.I. Varminskaya², A.I. Ryzhkov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

It is shown that when generalizing the Lagrange task on optimal control (acceleration) of the "acceleration-deceleration" type by moving an object from the initial to the final state of quiescence (for a given motion time and distance), there is a maximum possible control energy to achieve the goal of motion. Comparison of the results with those known from the theory of optimal control is given.

Keywords: Lagrange task, variational method, "acceleration-deceleration", motion goal, control design, minimum energy consumption.

Введение

Теория оптимального управления развита в трудах [1 – 7] и других. Обычно заранее задается критерий оптимальности, уравнение управляемого движения, краевые условия, и дальше для решения задачи применяется один из методов теории оптимального управления.

Однако, практические задачи оптимального управления не исключают возможностей находить решения поставленных задач альтернативными методами. При этом, если исходить из предпосылки, что приоритетом является цель движения, а затем находятся средства для ее достижения, то возможен другой поиск управления (ускорения), при котором функционал-критерий появляется

на заключительном этапе решения задачи синтеза управления, оптимальность которого подтверждается экстремумом функционала-критерия. Такой алгоритм поиска управления – решение полной обратной задачи вариационного исчисления [9 – 14]. Использованию данного алгоритма посвящена работа [9].

Как показано в [9], применение реверсионного принципа оптимальности (РПО) приводит к новому качеству оптимального управляемого движения – экономии энергии.

Особенности синтеза управлений будут иллюстрироваться на примере известной задачи Лагранжа.

Цель исследования – анализ динамики объекта при оптимальном управлении с предельно минимальной энергоемкостью.

Релейное неоптимальное управление

При релейном управлении типа «разгон-торможение», заданных массе m , расстоянии L , времени движения T (рис. 1) и управлении $U_0 = \pm \frac{4mL}{T^2}$ общая энергия, затрачиваемая на реализацию такого движения $A = 2 \frac{4mL}{T^2} \frac{L}{2} = \frac{4mL^2}{T^2}$ Дж. Управление не оптимально, но цель движения достигается – перемещение объекта на расстояние L за время T из исходного состояния покоя в конечное состояние покоя.

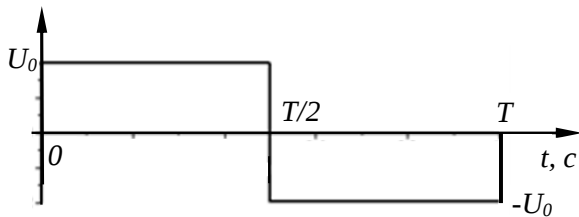


Рис. 1. График релейного управления

Решение задачи Лагранжа. Полная обратная задача вариационного исчисления

Простая задача Лагранжа может быть решена без предварительного использования критерия оптимальности.

Заданы условия:

$$S_e(0)=0, \quad \dot{S}_e(0)=0, \quad S_e(T)=L, \quad \dot{S}_e(T)=0. \quad (1)$$

Движение описывается полиномом:

$$S_e(t) = \sum_{i=1}^4 C_i t^{i-1} = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3. \quad (2)$$

Скорость переносного движения:

$$V_e(t) = \dot{S}_e(t) = C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2. \quad (3)$$

Подчиняя (2) и (3) условиям (1), получим систему алгебраических уравнений, из которой определяются константы $C_{1..4}$ полинома (2):

$$C_1 = 0; \quad C_2 = 0; \quad C_3 = \frac{3L}{T^2}; \quad C_4 = -\frac{2L}{T^3}.$$

Поэтому переносное ускорение (управление) переносного движения принимает вид:

$$\ddot{S}_e(t) = U_e(t) = \frac{6L}{T^2} \left(1 - \frac{2t}{T}\right). \quad (4)$$

А зависимости для перемещения $S_e(t)$ и переносной скорости $V_e(t)$:

$$V_e(t) = \frac{6Lt}{T^2} \left(1 - \frac{t}{T}\right), \quad S_e(t) = \frac{Lt^2}{T^2} \left(3 - \frac{2t}{T}\right)$$

Из (4) следует дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^4 S_e}{dt^4} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2 U_e}{dt^2} = 0. \quad (5)$$

И теперь с использованием (5) реверсионно восстанавливается известный функционал $J = \int_0^T (\ddot{S}_e)^2 dt = \int_0^T (U_e)^2 dt$, для которого (5) является уравнением Эйлера. Графики $S_e(t), V_e(t), U_e(t)$ при $T = 1$ с, $m = 1$ кг, $L = 1$ м изображены на рис. 2.

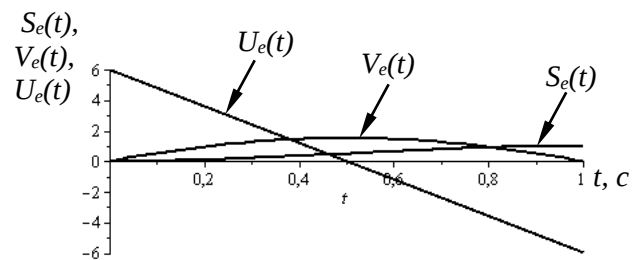


Рис. 2. Графики движения при управлении (4)

В данном случае дифференциальное уравнение Якоби представляет имеет вид $\frac{d^2 u(t)}{dt^2} = 0$, и имеющее решение $\tau(t) = C_1 t + C_2$. Поскольку при $t=0, u(0)=0$, то $C_2 = 0$, $u(t) = C_1 t$. Следует отметить, что согласно (1) $S_e(0)=0$, а $\tau(t) = \frac{d S_e(t, c)}{dC}$, то, следовательно, при $t=0$ $u(t)=0$. Таким образом, функция обращается в нуль только в точке $t=0$, а это значит, что условие Якоби выполнено, т.е. функцию можно включить в центральное поле экстремалей с центром в точке (0,0). Итак, функция принадлежит центральному полю экстремалей.

Также выполняется и условие Лейбница: $F_{y'y'} = \frac{288L}{T^6} > 0$.

Здесь вполне уместно привести слова Л. Эйлера: «...в мире не происходит ничего, в чем не был бы виден смысл какого-либо максимума или минимума...пути для познания явлений природы – один через производящие причины, который обычно называют прямым методом, другой – через конечные причины...».

Поэтому естественно утверждать, что восстановленный функционал-критерий отражает экстремальное свойство движения объекта (рис. 2).

Энергия

$$A_1 = 2 \int_0^{T/2} mU_e(t)V_e(t)dt = \frac{2,25mL^2}{T^2}.$$

Действие (по Лагранжу в форме Мопертюи)

$$J_1 = m \int_0^T V_e^2(t)dt = \frac{1,2mL^2}{T}.$$

По сравнению с релейным управлением видна существенная экономия энергии и действия на реализацию движения, так как уменьшается площадь под кривыми переносных ускорения $U_e(t)$ и скорости $V_e(t)$.

Реверсионное конструирование управления

Пусть перемещение объекта описывается полиномом:

$$S_e(t) = \sum_{i=1}^6 C_i t^{i-1} = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4 + C_6 t^5,$$

из которого следует

$$\dot{S}_e(t) = \frac{dS_e(t)}{dt}, \quad U_e(t) = \frac{dV_e(t)}{dt} = \ddot{S}_e(t).$$

С учетом прежних краевых условий и дополнительных условий, отражающих свойство косої симметрии управления (ускорения) $U_e(t)$

$$U_e(0) + U_e(T) = 0, \quad \frac{dU_e}{dt}(T/2) = 0,$$

после определения констант полинома и его факторизации получены аналитические за-

висимости для управления (ускорения) и скорости в переносном движении:

$$U_e(t) = \frac{10L}{T^2} \frac{(T-2t)^3}{T^3},$$

$$V_e(t) = \frac{10L}{T^2} \frac{(T-t)(2t^2 - 2Tt + T^2)t}{T^3}. \quad (6)$$

Для этого случая энергия

$$A_2 = 2 \int_0^{T/2} mU_e(t)V_e(t)dt = \frac{1,5625mL^2}{T^2},$$

действие по Лагранжу в форме Мопертюи

$$J_2 = m \int_0^T V_e^2(t)dt = \frac{1,1111mL^2}{T}.$$

По сравнению с предыдущим примером энергия и действие существенно уменьшаются, а восстанавливаемый функционал-критерий имеет вид: $\int_0^T (\dot{U}_e)^2 dt$. Теперь мож-

но воспользоваться этим критерием и решить задачу классическим вариационным методом теории оптимального управления.

Последовательное увеличение степени полинома для описания конструируемого оптимального переносного движения и последующее обобщение результатов и ряд проверок привели к универсальным аналитическим зависимостям для переносного ускорения (управления), переносной скорости и перемещения объекта:

$$U_e = \frac{L(2n+4)(T-2t)^n}{T^{n+2}},$$

$$V_e = -\frac{L(n+2)}{T} \left((T-2t)^{n+1} \cdot T^{n-1} - 1 \right),$$

$$S_e = \frac{L}{2T(n+1)} \left(T^{-n-1} (T-2t)^{n+2} + 2tn + 4t - T \right).$$

Из приведенных зависимостей при $n = 1$ следует выражение (4), а при $n = 3$ – соответственно выражение (6). Установлено, что с ростом степени полинома функций перемещения $S_e(t)$, переносных скорости $V_e(t)$ и ускорения $U_e(t)$ стремятся к своему предельному значению; энергия, при которой достигается цель движения, стремится к минимуму.

Графики перемещения $S_e(t)$, переносных скорости $V_e(t)$ и ускорения $U_e(t)$ построены при $T = 1$ с, $m = 1$ кг, $L = 1$ м, $n = 1111$ (рис. 3). В этом случае энергия

$$A_p = \lim_{n \rightarrow \infty} 2m \int_0^{T/2} U_e(t) V_e(t) dt = 1 \text{ Дж.}$$

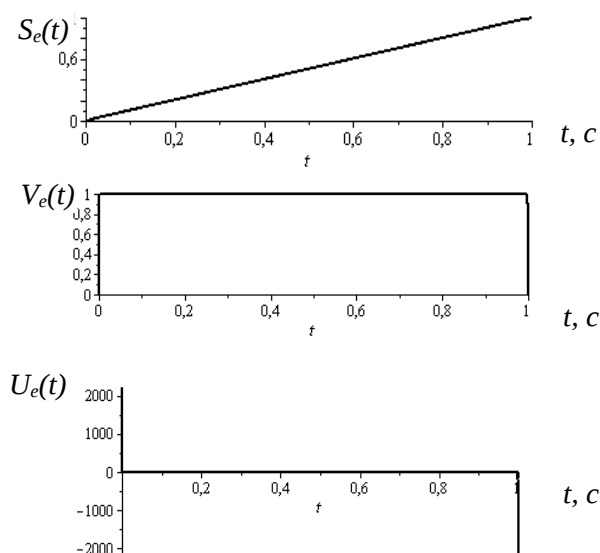


Рис. 3. Графики перемещения $S_e(t)$, скорости $V_e(t)$, ускорения $U_e(t)$ при минимальной энергии

Из графиков следует, что предельное оптимальное управление содержит положительную и отрицательную дельта-функции (импульсы ускорения или замедления), которые как сообщают, так и устраняют скорость движения объекта, причем во временном интервале $T \geq t \geq 0$ объект движется практически равномерно.

Для реализации такого движения дельта-функцию можно заменить импульсом, время действия которого при прежних исходных данных находится из уравнения:

$$\int_0^{\tau_1} U_e(t) dt = 1. \quad (7)$$

Из уравнения (7) с ошибкой $|\Delta| = 4,68 \cdot 10^{-8}$ первый наименьший корень $\tau_1 = 0,0031$ с.

Графики $V_e(t)$ и $U_e(t)$ в интервале $\tau_1 \geq t \geq 0$ изображены на рис.4.

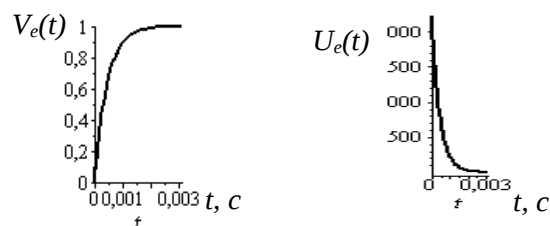


Рис. 4. Графики $V_e(t)$ и $U_e(t)$ в окрестности $t = 0$

Полученный результат проверен с использованием численных экспериментов, подтвердивших характер асимптотического уменьшения энергии и действия (по Лагранжу в форме Мопертюи) при возрастании степени полинома.

Заключение

В результате обобщения задачи Лагранжа выявлено существование предельной энергоемкости управления, при которой достигается (за заданное время T и перемещении на расстояние L) цель движения – перемещение объекта в новое состояние покоя.

Минимально энергоемкое управление типа «разгон-торможение» применимо в различных областях современной техники, как в земных условиях, так и в состоянии невесомости.

При оптимальном перемещении упругого объекта время движения, с целью подавления колебаний в конечном состоянии, находится как один из общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые преобразуются моментные соотношения в относительном движении.

Использование предложенного метода конструирования целенаправленного движения предоставляет возможность осуществления выбора ускорения как по быстродействию (исходя из общих корней трансцендентных уравнений перемещения и скорости в относительном движении), так и с учетом минимума энергии, необходимой на реализацию движений исполнительными элементами электромеханических систем.

Список литературы

1. Красовский Н.Н. Теория оптимального управления / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.

2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
3. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
4. Троицкий А.И. Оптимальные процессы колебаний механических систем / А.И. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
5. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
6. Теория автоматического регулирования. Ч II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с.
7. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 416 с.
8. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
9. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
10. Бохонский А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 3(347) 2021. – С. 12 – 20.
11. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
12. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
13. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
14. Bokhonsky A.I. Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // IOP Conference Series. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019). – Том. 709, 4, Issue 3. – P. 044093. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044093.
15. aemyh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – М.: Nauka, 1987. – 304 p.
16. 3. CHernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – М.: Nauka, 1980. – 384 p.
17. 4. Troickij A.I. Optimal'nye processy kole-baniy mekhanicheskikh sistem / A.I. Troickij. – Л.: Mashinostroenie, 1976. – 248 p.
18. 5. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – М.: Mashinostroenie, 1985. – 536 p.
19. 6. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. V. II. Teoriya nelinejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. A.A. Voronova. – М.: Gosizdat, 1955. – 248 p.
20. 7. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyyh sistem / I.A. Karnovskij, Yu.M. Pochtman. – К.: Vyssh. shk., 1982. – 416p.
21. 8. Bokhonsky A.I. Variacionnoe i reversion-noe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya; Pod obshch. red. A.I. Bokhonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 212 p.
22. 9. Bokhonsky A.I. Reversionnyy princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – М.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016. – 174 p.
23. 10. Bokhonsky A.I. Princip i teoremy reversionnogo ischisleniya / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. – № 3(347) 2021. – P. 12 – 20.
24. 11. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Konstruirovaniye optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob'ektov: monografiya / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – Sankt-Peterburg: NIC MS, 2020. – 120 p.
25. 12. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
26. 13. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
27. 14. Bokhonsky A.I. Evaluation of energy consumption for the object motion optimal control / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // IOP Conference Series. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019). – Том. 709, 4, Issue 3. – P. 044093. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044093.

References

1. Krasovskij N.N. Teoriya optimal'nogo upravleniya / N.N. Krasovskij. – М.: Nauka, 1968. – 476p.
2. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravly-

УДК 621. 923

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОНАРЕЗНЫХ СТАНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

А.О. Харченко, А.А. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье представлены результаты анализа и исследований в направлении совершенствования технологического оборудования для внутренней резьбообработки деталей в условиях гибкого автоматизированного производства. Рассмотрены методы оценки эксплуатационной надежности резьбонарезных станочных модулей, которые могут быть положены в основу разрабатываемой методики синтеза его элементов. Технологическую систему модуля предложено рассматривать как систему, в которой переходы из состояния в состояние происходят под действием простейших потоков с параметрами вероятностей перехода непрерывной марковской цепи. Разработанная математическая модель, описывающая состояния модуля с учетом отказов функционирования его элементов, а также с учетом восстановлений после этих видов отказов, позволяет отразить влияние на работу модуля параметров потоков отказов и восстановлений инструмента, станка, приспособления, загрузочного устройства. Решение полученных систем уравнений финальных вероятностей позволяет для заданных (или полученных экспериментально) интенсивностей потоков отказов для резьбонарезных станочных модулей получить значения вероятности безотказной работы, а также вероятностей нахождения системы в нерабочем состоянии по причине соответствующих отказов его элементов. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, чтобы на этапе параметрического синтеза определить уязвимые по выработанному критерию элементы, усовершенствование которых приведет к созданию наиболее эффективной системы.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, внутренняя мелкогабаритная резьбообработка, технологические элементы модуля, резьбонарезной станочный модуль, простейший поток, марковская цепь, вероятность безотказной работы.

OPERATIONAL RELIABILITY STUDY THREADING MACHINE MODULES

A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of analysis and research in the direction of improving technological equipment for internal threading of parts in a flexible automated production. Methods for assessing the operational reliability of thread-cutting machine-tool modules, which can be used as the basis for the developed method of synthesis of its elements, are considered. It is proposed to consider the technological system of the module as a system in which transitions from state to state occur under the action of the simplest flows with the parameters of the transition probabilities of a continuous Markov chain. The developed mathematical model, which describes the states of the module, taking into account the failures of the functioning of its elements, as well as taking into account the recovery after these types of failures, makes it possible to reflect the influence on the operation of the module of the parameters of the flows of failures and recoveries of the tool, machine, fixture, loading device. The solution of the obtained systems of equations of final probabilities allows for given (or experimentally obtained) rates of failure flows for thread-cutting machine tool modules to obtain the values of the probability of failure-free operation, as well as the probabilities of finding the system in an inoperative state due to the corresponding failures of its elements. The measures taken make it possible to solve the synthesis problem at the level of structural and layout optimization, so that at the stage of parametric synthesis to determine the elements that are vulnerable according to the developed criterion, the improvement of which will lead to the creation of the most efficient system.

Keywords: operational reliability, internal small-sized thread processing, technological elements of the module, thread-cutting machine module, simple flow, Markov chain, probability of failure-free operation.

Вопросы создания эффективного технологического оборудования для условий гибкого автоматизированного производства, в частности, для мелкоразмерной резьбообработки на основе современных технологических элементов (станок, инструмент, приспособление, загрузочное устройство) должны быть решены на уровне новых требований. Решение этой актуальной задачи связано с получением значительного экономического эффекта за счет повышения производительности обработки и улучшения качества изделий. При создании элементов резьбонарезных станочных модулей следует учитывать влияние потоков отказов (параметрических и функциональных), а также потоков переналадки на выходные показатели системы. Необходимо связать в единое целое параметры переналадки технологических элементов модуля с эксплуатационной и технологической надежностью, описать процесс формирования показателей как результат их взаимодействия в реальных условиях функционирования резьбонарезного оборудования. Влияние эксплуатационной надежности на производительность и экономическую эффективность оценивается с помощью введения коэффициента готовности либо коэффициента технического использования [1, 2]. Получение указанной оценки представляет практический интерес, однако не учитывает всех аспектов, связанных с переналадкой системы и параметрическими отказами различных элементов.

В работе [3] В.Я. Катковник предложил модели производительности на основе учета внезапных отказов элементов технологической системы, предполагая законы надежности пуассоновскими, и распределение времени восстановления по экспоненциальному закону. При этом установившиеся вероятности существуют и для их определения использованы известные результаты математической теории массового обслуживания [4]. Такой подход к построению математических моделей полезен на предварительном этапе синтеза системы, но для оценки эффективности модулей на последних этапах параметрического синтеза тако-

го показателя явно недостаточно из-за допущений об однородности элементов системы в смысле отказов и обслуживания.

В основу методов аналитической оценки технологической надежности элементов обычно закладываются математические модели изменения точности обработки во времени [5, 6]. В развитие теоретических положений о процессе формирования погрешностей обработки на многооперационных станках большой вклад внесли работы А.С. Проникова [1, 7]. Разработанные модели для анализа и прогнозирования надежности создают возможности поиска путей уменьшения влияния погрешностей на изменение надежности и воздействия на надежность не только организационными, но и конструкторскими методами. Такой подход целесообразно использовать при синтезе модулей на стадии оценки интенсивности параметрических отказов технологических элементов посредством выбора основных видов исходных погрешностей. Для процессов нарезания резьб необходимо при этом определить основные параметры точности обработки, разработать методику их оценки.

Исследования технологической надежности резьбонарезного оборудования приведены в работе В.В. Матвеева [8], предложившего гипотезу о механизме образования размера при работе метчиком, согласно которой профиль на изделии образуется в результате «переноса» размера инструмента при резании. Автор теоретически и экспериментально доказал, что при достигнутом уровне точности исполнения технологической системы нарезание точных резьб может быть выполнено, если удастся найти оптимальные конструкции метчиков, метчикодержателей, несущих шпинделей и самих станков. Используемый исследователями [9, 10] подход позволяет прогнозировать точность резьбовых отверстий при обработке различных материалов и производить разработку практических рекомендаций. Методы определения точностных параметров резьбы могут быть приняты за основу при определении характеристик

технологической надежности элементов резбонарезных станочных модулей.

Исследование эксплуатационной надежности резбонарезного оборудования, проведенное А.А. Грудовым [11] и другими авторами [12, 13], показали, что в результате поломки выходит из строя 50...70% режущих мелкогабаритных метчиков (М2...М6). Ранжирование по удельному весу отказов свидетельствует о том, что на первом месте находятся инструменты, затем соответственно – механические узлы, электро- и гидрооборудование [14]. В качестве мероприятий по повышению надежности инструмента следует увеличить его стойкость, прочность, большее внимание уделить выбору его конструкции, режимов эксплуатации. В настоящее время известно множество конструкций метчиков и схем резания [15]. Выполнен ряд исследований процесса накатывания резьб бесстружечными – пластическими деформирующими метчиками (ПДМ). Отличием нарезания от накатывания является то, что в первом случае резьба формируется вырезанием металла, а во втором – выдавливанием, то есть без образования стружки, что является одним из преимуществ метода накатывания, в особенности при обработке глухих резьб. Существенную роль в популяризации и внедрении нового метода сыграли исследования и разработки Э.В. Рыжова [16], а также государственные стандарты на бесстружечные метчики, в основу которых положены результаты работ В.М. Меньшакова [12]. По вопросу надежности ПДМ можно встретить противоречивые мнения. Некоторые авторы не получают повышения стойкости накатывающего инструмента в сравнении с режущим, а другие получают увеличение в 10...20 раз. Исследованиями В.Г. Якухина [13] установлена закономерность: накатывание резьб тем эффективнее, чем меньше размер резьб. Например, при накатывании резьб М3...М4 в заготовках из вязких материалов удается получить повышение стойкости инструмента в 10 раз, но с увеличением диаметра разница в стойкости резко уменьшается и для резьб М10...М12 преимуществ по стойкости не наблюдается.

Таким образом, рекомендации исследователей в основном предназначены и эффективны для узких областей, что затрудняет их использование в новых условиях, которые характерны для гибкого автоматизированного производства. Эти особенности следует учитывать при создании элементов резбонарезных станочных модулей.

Анализ литературных источников показывает, что ГПМ резьбообработки обладает всеми признаками технических динамических систем. К таким признакам относятся следующие: модуль состоит из отдельных взаимодействующих подсистем; состояние подсистем и модуля в целом изменяется во времени; каждая подсистема и модель в целом характеризуется текущим состоянием, историей развития [17, 18].

На основе принятых допущений с учетом проведенного анализа переналадки резбонарезных модулей для оценки вариантов выбранных структур необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования и параметрических отказов, то есть эксплуатационную и технологическую надежность модуля. Каждый элемент технологической системы может иметь различные интенсивности восстановления μ , также, как и различные интенсивности отказов λ , т.е. разную надежность. При этом более сложный элемент при одинаковом λ может иметь меньшее значение μ (меньшую надежность), либо при одинаковом μ большее значение λ , чем менее сложный элемент. Это необходимо учесть при выборе критериев оценки эффективности модуля.

Рассматривая резбонарезной модуль как дискретную систему, примем, что элементы отказывают независимо друг от друга, причем каждый элемент после отказа восстанавливается. Будем считать, что исходные свойства элемента никак не влияют на надежность других элементов. Моменты отказов каждого элемента образуют процесс восстановления, причем в силу наших предположений, эти процессы независимы. Обозначим через $F_k(t)$ закон распределения времени жизни k -го технологического элемента. Предполагаем, что эти законы

имеют непрерывную плотность $f_k(t)$ и существуют среднее время жизни технологического элемента T_k и его дисперсия σ_k^2 .

Поскольку элементы в системе модуля соединены (в смысле надежности) последовательно, то отказ любого элемента вызывает отказ системы. Появление отказов на одном участке времени не меняет (точнее почти не меняет) вероятности появления какого-либо числа отказов на другом участке, не пересекающимся с первым. Из этих физических соображений следует, что при сделанных выше предположениях в потоке отказов технологической системы модуля должно отсутствовать последствие. Кроме того, мы предположили выше, что законы распределения $F_k(t)$ имеют непрерывные плотности. Отсюда следует, что $H(t)$ – среднее число отказов – непрерывна и поток отказов системы модуля является ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов равна нулю. В теории массового обслуживания доказывается, что ординарный поток с непрерывной функцией $H(t)$, в котором отсутствует последовательность, является простейшим нестационарным потоком. Это значит, что вероятность появления n отказов на любом участке (t_1, t_2) выражается формулой

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{[H(t_2) - H(t_1)]^n}{n!} e^{-[H(t_2) - H(t_1)]}$$

и для любой системы неперекрывающихся интервалов события, заключающиеся в появлении заданного числа отказов на каждом интервале, независимы. Итак, показано, что при достаточно общих условиях поток отказов технологической системы модуля будет простейшим нестационарным потоком. Из предыдущей формулы видно, что число отказов на каждом интервале распределено по закону Пуассона (пуассоновский поток с переменным параметром). Этим переменным параметром является интенсивность отказов $\lambda(t)$. Тогда вышеприведенную формулу можно записать в виде:

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]^n}{n!} e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} \quad (1)$$

Если на участке $(t, t+\tau)$ функция $\lambda(t)$ приближенно линейна, то хорошее соответствие для этих вероятностей дает равенство:

$$P_n(t_1, t_2) \approx \frac{\left[\lambda \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \tau \right]^n}{n!} e^{-\lambda \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \tau} \quad (2)$$

Если же функция $\lambda(t)$ на этом участке приближенно постоянна, $\lambda(t) \approx \lambda$, то

$$P_n(t_1, t+\tau) \approx \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} e^{-\lambda \tau} \quad (3)$$

Так как на участках между соседними отказами $\lambda(t)$ почти не меняется, то среднее время до первого отказа технологического элемента выражается приближенной формулой $\bar{T}_p \approx 1/\lambda(t)$.

Как правило, работа технологической системы ГПМ продолжается достаточно долго, вследствие чего элементы (станок, инструмент, приспособление, загрузочное устройство) могут отказать по несколько раз. Так, инструмент в процессе недельной эксплуатации отказывает в среднем 120...140 раз. При этих условиях процессы восстановления становятся стационарными и, следовательно, поток отказов системы также устанавливается. Так как плотности восстановления для каждого элемента стремятся к пределам $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_k(t) = 1/T_k$, то интенсивность отказов системы имеет предел $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \lambda_0 = \sum_{k=1}^m 1/T_k$, где m – число технологических элементов. При этом поток системы становится пуассоновским потоком с постоянным параметром, т.е. простейшим потоком. Для этого потока вероятность появления n отказов на участке времени длительности τ не зависит от положения этого участка и выражается формулой:

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} e^{-\lambda_0 \tau}. \quad (4)$$

В частности, вероятность безотказной работы системы модуля в течение времени τ равна $P_0 \tau = e^{-\lambda_0 \tau}$, следовательно среднее время безотказной работы равно $\bar{T} = 1/\lambda_0$.

Поскольку число отказов, появляющихся в заданном интервале времени, имеет пуассоновское распределение, то время между отказами имеет экспоненциальное распределение, т.е. надежность каждого технологического элемента в системе модуля подчиняется экспоненциальному закону:

$$F_k(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}. \quad (5)$$

Процесс восстановления для каждого элемента будет образовывать простейший поток и поток восстановления системы модуля как сумма простейших потоков также будет потоком простейшим.

Приведенные доводы и рассуждения вполне справедливы при рассмотрении эксплуатационной надежности (отказов функционирования) технологической системы ГПМ резьбообработки. Для анализа технологической надежности (параметрических отказов) системы необходимо учитывать действие таких факторов, как силы резания (быстропротекающие процессы), износ инструмента, приспособления, загрузочного устройства (процессы средней скорости), износ направляющих стола, шпиндельных опор, фиксирующих элементов приспособления (медленно протекающие процессы).

С учетом вышеприведенных доводов технологическую систему ГПМ резьбообработки рассмотрим как физическую дискретную систему, которая может находиться в состояниях S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 . Состояние S_0 , характеризует нормальное функционирование модуля при отсутствии отказов.

В состоянии S_1 требуется замена вышедшего из строя инструмента вследствие потока отказов его функционирования с интенсивностью λ_1 . В этом случае $\lambda_1 = 1/\bar{T}_{u'}$,

где $\bar{T}_{u'}$ – среднее время между двумя отказами функционирования, *мин*.

Состояние S_2 характеризуется выходом из строя станка (в том числе резьбонарезной головки) из-за потока отказов с интенсивностью λ_2 . При этом $\lambda_2 = 1/\bar{T}_{c'}$, где $\bar{T}_{c'}$ – среднее время между двумя отказами функционирования станка, *мин*.

В состоянии S_3 требуется ремонт вышедшего из строя приспособления вследствие потока отказов с интенсивностью λ_3 .

В этом случае $\lambda_3 = 1/\bar{T}_{n'}$, где $\bar{T}_{n'}$ – среднее время между двумя отказами функционирования приспособления, *мин*.

Состояние S_4 характеризуется выходом из строя загрузочного устройства вследствие потока отказов функционирования с интенсивностью λ_4 . При этом $\lambda_4 = 1/\bar{T}_{z'}$,

где $\bar{T}_{z'}$ – среднее время между двумя отказами функционирования загрузочного устройства, *мин*.

Величины $\bar{T}_{u'}$, $\bar{T}_{c'}$, $\bar{T}_{n'}$, $\bar{T}_{z'}$ определяются по общей формуле:

$$\bar{T}' = \sum_{j=1}^m t_j / m, \quad (6)$$

где m – число отказов функционирования соответствующего технологического элемента ГПМ резьбообработки; t_j – интервал времени между $(j-1)$ -й и j -й заявками.

Каждый технологический элемент модуля подвергается восстановлению сразу после отказа. Интенсивность восстановления соответственно для каждого технологического элемента будет $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, считая при этом, что время восстановления, являясь случайной величиной, подчиняется закону Пуассона. В этом случае $\mu_1 = 1/\bar{T}_{vu'}$, $\mu_2 = 1/\bar{T}_{vc'}$, $\mu_3 = 1/\bar{T}_{vn'}$, $\mu_4 = 1/\bar{T}_{vz'}$, где $\bar{T}_{vu'}$ – среднее время восстановления (замены) инструмента, *мин*; $\bar{T}_{vc'}$ – среднее время восстановления (ремонта) элементов станка, в том числе резьбонарезной головки, *мин*; $\bar{T}_{vn'}$ – среднее время

восстановления (ремонта) приспособления, мин; $\overline{T_{вз'}}$ – среднее время восстановления (ремонта) загрузочного устройства, мин.

Для описания размеченного графа состояний технологической системы резбонарезного станочного модуля с учетом отказов функционирования (рис. 1) обозначим:

P_0 – вероятность исправной работы модуля, $P_0 = P(S_0)$;

P_1, P_2, P_3, P_4 – соответственно вероятности поломки (выхода из строя) инструмента, элементов станка и резбонарезной головки, приспособления, загрузочного устройства.

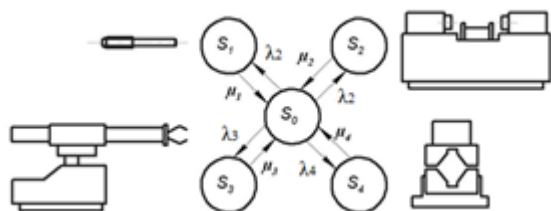


Рис. 1. Размеченный граф состояний технологической системы резбонарезного станочного модуля с учетом отказов функционирования

Уравнения А.Н. Колмогорова для финальных вероятностей P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 состояний S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 представляются в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) &= P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4 \\ P_1\mu_1 &= P_0\lambda_1 \\ P_2\mu_2 &= P_0\lambda_2 \\ P_3\mu_3 &= P_0\lambda_3 \\ P_4\mu_4 &= P_0\lambda'_4 \end{aligned} \right\}$$

Решение полученной системы уравнений с помощью условия нормировки $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ позволяет получить выражения (7) для вероятности безотказной работы (P_0), а также вероятностей нахождения системы в нерабочем состоянии по причине соответствующих поломок (выхода из строя) инструмента (P_1), элементов стан-

ка (P_2), приспособления (P_3), загрузочного устройства (P_4).

Разработанная математическая модель, описывающая состояния ГПМ резбонарезной с учетом отказов функционирования его технологических элементов, а также восстановлений после указанных отказов, позволяет учесть эксплуатационную надежность инструмента, силовой резбонарезной головки, базовых элементов станка, приспособления, загрузочного устройства при выборе оптимальной структуры модуля.

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= (1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \lambda_3/\mu_3 + \lambda_4/\mu_4)^{-1} \\ P_1 &= P_0 \lambda_1/\mu_1 \\ P_2 &= P_0 \lambda_2/\mu_2 \\ P_3 &= P_0 \lambda_3/\mu_3 \\ P_4 &= P_0 \lambda'_4/\mu_4 \end{aligned} \right\} (7)$$

Структура модели и размеченный граф состояний системы могут совершенствоваться по мере уточнения числа параметров и характеристик. Для полной информации и объективной оценки предпочтительного для использования в условиях ГПС варианта необходим учет стохастических процессов, происходящих в системе в реальных условиях функционирования, а также выработка критерия оптимальности и интегральной оценочной функции. Эти показатели должны учитывать наряду с надежностью (эксплуатационной и технологической) также гибкость (перенастраиваемость) и экономическую эффективность модуля [19, 20, 21, 22]. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, чтобы на этапе параметрического синтеза определить уязвимые по выработанному критерию технологические элементы, усовершенствование которых приведет к созданию наиболее эффективной системы.

Список литературы

1. Проников А.С. Металлорежущие станки и автоматы / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1981. – 479 с.

2. Пуш В.Э. Автоматические станочные системы / В.Э. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.

3. Вопросы теории и техники гибких автоматизированных производственных систем // Сборник научных трудов: Труды ЛПИ, 1984. – №400. – 104 с.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

5. Григорьян Г.Д. Элементы надежности технологических процессов / Г.Д. Григорьян. – Киев-Одесса: Вища школа, 1984. – 214 с.

6. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 380 с.

7. Проников А.С. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с.

8. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.

9. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.

10. Ямников А.С. Определение динамических погрешностей при нарезании резьб мерным инструментом / А.С. Ямников // Исследования в области технологии образования наружных и внутренних резьб, резьбообразующих инструментов, станков и методов контроля резьб: Межвуз. сб. – Тула: ТПИ, 1974. – С.68-72.

11. Грудов А.А. Пути увеличения точности нарезаемой резьбы и стойкости метчиков / А.А. Грудов. – М.: МСИП, ВНИИ, 1971. – 128 с.

12. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.

13. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.

14. Меламед Г.И. Гибкое автоматическое производство. Станки с ЧПУ и роботы / Г.И. Меламед, Б.М. Турсунов. – Минск: Беларусь, 1986. – 159 с.

15. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкогабаритных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.

16. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Стешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.

17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48-52.

18. Харченко А.О. Разработка гибких производственных модулей с учетом надежности технологических систем / А.О. Харченко. – К.: Общество «Знание», 1989. – 20 с.

19. Нахапетян Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1985. – 224 с.

20. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.

21. Долгин В.П. Надежность технических систем: учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2015. – 167 с.

22. Харченко А.О. Структурно-компоновочный синтез подсистем модулей для внутренней резьбообработки / А.О. Харченко, А.А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. – № 4-2 (342). – С.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

References

1. Pronikov A.S. Metallorazreshchkiye stanki i avtomaty (Metal-cutting machines and automatic machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 479 s.

2. Push V.E. Avtomaticheskiye stanochnyye sistemy (Automatic machine tools) / V.E. Push, R. Pigert, V.L. Sosonkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 319 s.

3. Voprosy teorii i tekhniki gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem (Questions of theory and technology of flexible automated production systems) // Sbornik nauchnykh trudov: Trudy LPI, 1984. – №400. – 104 s.

4. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya (Probability theory and its engineering applications) / Ye.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – M.: Vysshaya shkola, 2000. – 480 s.

5. Grigor'yan G.D. Elementy nadezhnosti tekhnologicheskikh protsessov (Elements of reliability of technological processes) / G.D. Grigor'yan. – Kiev-Odessa: Vishcha shkola, 1984. – 214 s.

6. Matalin A.A. Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov (Accuracy of mechanical processing and design of technological processes) / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroyeniye, 1970. – 380 s.

7. Pronikov A.S. Tochnost' i nadezhnost' stankov s chislovym programmnyy upravleniyem (Accuracy and reliability of numerical control machines) / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 279 s.

8. Matveyev V.V. Narezaniye tochnykh rez'b (Precision thread cutting) / V.V. Matveyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 88 s.

9. Frumin Yu.L. Vysokoproizvoditel'nyy rez'boobrazuyushchiy instrument (High-performance thread-forming tool) / Yu.L. Frumin. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 183 s.

10. Yamnikov A.S. Opredeleniye dinamicheskikh pogreshnostey pri narezanii rez'b mernym instrumentom (Determination of dynamic errors when cutting threads with a measuring instrument) / A.S. Yamnikov // Issledovaniya v oblasti tekhnologii obrazovaniya naruzhnykh

i vnutrennikh rez'b, rez'boobrazuyushchikh instrumentov, stankov i metodov kontrolya rez'b: Mezhdvuz. sb. – Tula: TPI, 1974. – S.68-72.

11. Grudov A.A. Puti uvelicheniya tochnosti narezayemoy rez'by i stoykosti metchikov (Ways of increasing the accuracy of the cut thread and the resistance of taps) / A.A. Grudov. – M.: MSIP, VNII, 1971. – 128 s.

12. Men'shakov V.M. Besstruzhechnyye metchiki (Shaving taps) / V.M. Men'shakov, G.P. Urlapov, V.S. Sereda. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 167 s.

13. Yakukhin V.G. Optimal'naya tekhnologiya izgotovleniya rez'b (Optimal technology for the manufacture of threads) / V.G. Yakukhin. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.

14. Melamed G.I. Gibkoye avtomaticheskoye proizvodstvo. Stanki s ChPU i roboty (Flexible automatic production. CNC machines and robots) / G.I. Melamed, B.M. Tursunov. – Minsk: Belarus', 1986. – 159 s.

15. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya melkorazmernykh rez'b metchikami v aluminievyykh splavakh: monografiya (Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.

16. Ryzhov E.V. Raskatyvaniye rez'b (Thread rolling) / E.V. Ryzhov, O.S. Andreychikov, A.Ye. Steshkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 122 s.

17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell /

Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48-52.

18. Kharchenko A.O. Razrabotka gibkikh proizvodstvennykh moduley s uchetom nadezhnosti tekhnologicheskikh sistem (Development of flexible production modules taking into account the reliability of technological systems) / A.O. Kharchenko. – K.: Obshchestvo «Znaniye», 1989. – 20 s.

19. Nakhapetyan Ye.G. Diagnostirovaniye oborudovaniya gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva (Diagnosing Equipment for Flexible Automated Production) / Ye.G. Nakhapetyan. – M.: Nauka, 1985. – 224 s.

20. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines: practical) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – M.: Tsentrkatalog, 2018. – 144 s.

21. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem (Reliability of technical systems) / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2015. – 167 s.

22. Kharchenko A.O. Strukturno-komponovochnyy sintez podsistem moduley dlya vnutrenney rez'boobrabotki (Structural-layout synthesis of subsystems of modules for internal thread processing) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2020. – № 4-2 (342). – S.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

УДК 621.9.025.77

ПЕРСПЕКТИВЫ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Дударев¹

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Российская Федерация

Аннотация

В статье приводится постановка вопроса о технологических проблемах механической обработки полимерных композиционных материалов. Перечислены альтернативные методы размерной обработки, которые в силу определенных технологических недостатков полностью не заменили механическую обработку, то есть механическая обработка является актуальной. Показано, что лезвийный режущий инструмент эффективно может работать лишь при определенных углах врезания в обрабатываемые заготовки из полимерных композиционных материалов. Предложена концепция алмазно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов, заключающаяся в том, что зёрна режущего инструмента за счет своей многочисленности и сложной формы способны перерезать армирующие волокна композита под любыми углами подачи алмазного или абразивного инструмента.

Ключевые слова: сверление, фрезерование, алмазный инструмент, абразивный инструмент, полимерные композиционные материалы, композит

PROSPECTS OF DIAMOND-ABRASIVE TOOLS FOR DRILLING AND MILLING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A.S. Dudarev¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Abstract

The article presents the formulation of the question of the technological problems of mechanical processing of polymer composite materials. Alternative methods of sizing are listed, which, due to certain technological shortcomings, have not completely replaced mechanical processing, that is, mechanical processing is relevant. It is shown that the blade cutting tool can work effectively only at certain angles of cutting into the processed workpieces made of polymer composite materials. The concept of diamond-abrasive processing of polymer composite materials is proposed, which consists in the fact that the grains of the cutting tool, due to their plurality and complex shape, are able to cut the reinforcing fibers of the composite at any angle of feed of the diamond or abrasive tool.

Keywords: drilling, milling, diamond tools, abrasive tools, polymer composite materials, composite

Общеизвестно, что понятие «композиционный материал» или «композит» является материалом, состоящим как минимум из двух и более компонентов [1]. При этом считается, что компоненты в композиции обладают суммарными свойствами, отличными от свойств компонентов в раздельности.

Однако, в настоящее время однозначного и общепринятого определения композиционных материалов (КМ) в технической литературе нет. Частично это объясняется тем, что КМ представляют собой очень широкий класс материалов, объединяющий и

металлы, и полимеры, и керамику и др. Еще большую сложность вызывает попытки классифицировать КМ. Часто используется их разделение по материаловедческому признаку, например по типу матричного материала. Известно, что у КМ армирующие элементы и скрепляющая их матрица может быть полимерной, отсюда и происходит название – полимерные композиционные материалы (ПКМ), керамические (ККМ), гибридные (ГКМ) и т.п. [1].

Перспективы массового применения полимерных композиционных материалов

связаны с разработкой новых видов армирующих волокон и матричных материалов (связующего). Что требует разработку и усовершенствование существующих технологических процессов производства.

При производстве, для размерной обработки современных полимерных композиционных материалов используют светолучевые (лазерные) [2, 3], электрофизические [4], гидроабразивные (ГАР) [5], механические методы обработки.

Из всех перечисленных методов размерной обработки наиболее технологически проработанными являются методы ГАР и методы механической обработки.

Известно, что среди ПКМ, углепластики характеризуются наибольшей чувствительностью к концентрации напряжений, а распространенным типом концентраторов напряжений являются сквозные отверстия, которые возможно формообразовать, как сказано выше – механической, гидроабразивной и лазерной обработкой. Для установления влияния методов формообразования на концентрацию напряжений около отверстий в ПКМ, в работе [6] были проведены механические испытания на прочность при растяжении (по ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766)) образцов из углепластика с ортотропной схемой армирования марки M21/35%/T700 разной толщины (1, 2, 3 мм) со сквозными отверстиями различных диаметров 6, 8, 16 мм. По данным источника [6] механическая обработка была проведена на специализированном обрабатывающем центре сверлами с алмазным покрытием серии Sandvik CoroDrill 854, гидроабразивная резка осуществлялась на установке фирмы RESATOR серии ACM, а лазерная обработка проводилась импульсным и непрерывным волоконными иттербиевыми лазерами моделей YLPP-1-150-30-M и ЛК-1000-ОМ. Испытания концентраторов напряжений около отверстий проводились на разрывной машине Tinius Olsen H1000KU при скорости движения траверсы 5 мм/мин.

Результаты испытаний показали, что обработка углепластиков излучением импуль-

сного и непрерывного волоконного иттербиевого лазера для диаметров 6 и 8 мм обеспечивает результат, по прочности сопоставимый с механической обработкой алмазным инструментом и на 15 % выше, чем гидроабразивная резка. А для диаметров 16 мм среди различных методов, механическая обработка вне конкуренции, только механическая обработка не создает значительных концентраторов вокруг обработанных отверстий. Данные результаты представлены в работе [6].

Механическая обработка полимерных композиционных материалов характеризуется низкой технологичностью, невысокой обрабатываемостью, низким качеством обработанных поверхностей, а также целым рядом технологических проблем [7].

Для механической обработки полимерных композиционных материалов на рынке режущего инструмента появляются вполне проработанные конструкции режущего инструмента, а именно сверла и фрезы. Ведущие производители режущего инструмента в своей номенклатуре создали линейки для обработки композитов. Среди инструментальных компаний следует выделить следующие компании, создающие лезвийный инструмент, преимущественно твердосплавный со сложными покрытиями, такие как: Kennametal Inc. (США), Seco (Швеция), Sandvik (Швеция), Walter (Германия), Maral (Германия), Cerin (Италия) и др. Вышеперечисленные компании производят инструмент, как для сверления отверстий в ПКМ, так и для фрезерования ПКМ и др. операций.

Лезвийный инструмент, в том числе ведущих мировых компаний, предназначенный для обработки ПКМ, объединяет то, что режущий клин совершенно случайно и непрогнозируемо вступает в контакт с армирующими волокнами ПКМ, а именно параметры контакта определяют обрабатываемость и другие выходные характеристики резания всего материала в целом (рис. 1).

Проектанты новых изделий из полимерных композиционных материалов, как правило, не могут предусмотреть благоприятную ориентацию волокон для последующего резания с контактами режущих кромок

«режущий инструмент-заготовка» по заранее заданным вариантам *а, б* или *в* (рис. 1). А механическая обработка возможна по всем вариантам. В ряде случаев, в угоду прочности изделия, на этапе проектирования закладывают продольно-поперечную (ортотропную) или усиленную гексагональную схему укладки армирующих волокон. Тогда подобрать режущей кромкой под требуемым углом к армирующим волокнам становится трудновыполнимой задачей, в результате появляется бахрома.

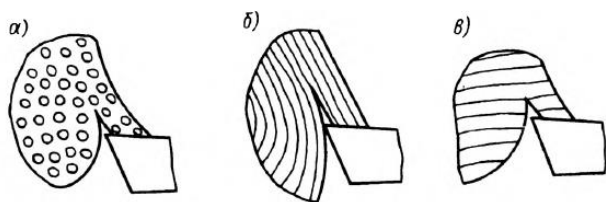


Рис. 1. Схема расположения режущего клина при резании ПКМ, по отношению к армированию: а) коаксиальное; б) тангенциальное; в) радиальное.

Наиболее благоприятной схемой расположения лезвия по отношению к армирующим волокнам, обеспечивающая брейющий режим перерезания волокон, является схема с радиальным контактом (рис.1, в), что дает возможным получение высокого качества обработки

Самой нежелательной схемой обработки (рис. 1, б), является схема с тангенциальным контактом при резании, так как будет наблюдаться отламывание волокон [7].

В общем случае, процесс идеализированного стружкообразования ПКМ может быть представлен, как на схемах с перерезанием волокон (рис. 1, в) и (рис. 2) с расположением волокон под углом 45° к вектору скорости резания.

Всех этих недостатков лишена концепция алмазно-абразивной обработки, потому что зерна расположены хаотическим образом на корпусе режущего инструмента (рис. 3) [8, 9].

И режущие зерна в силу своей изометрической формы многогранно вступают в контакт с достаточно мягкой поверхностью заготовки из ПКМ, и начинают перерезать волокна за счет своей кинетической энергии по направлению движения вектора резания.

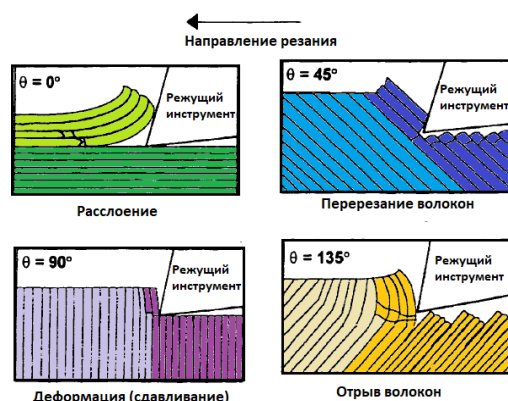


Рис. 2. Варианты углов с расположения волокон под углами $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=135^\circ$ к вектору скорости резания

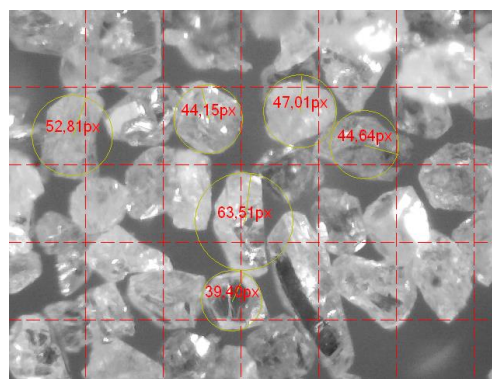


Рис. 3. Алмазные зерна зернистости 126 (ГОСТ Р 53922-2010) на поверхности инструмента

На рис. 4 для примера показано, что изометрическое единичное зерно, во-первых, способно резать как вдоль, так и поперёк волокон, а также под любым углом к волокнам композита, причём с любой ориентацией волокон, во-вторых, размер единичного зерна, может быть сопоставим с диаметром армирующих волокон.

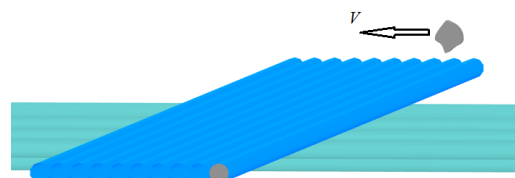


Рис. 4. Схема работы единичного зерна в направлении скорости резания

Действительно, диаметры волокон угольных нитей ПКМ составляют 0,11...0,15 мм, а размеры зёрен по ГОСТ Р 53922-2010 находятся в пределах 38÷1830 мкм. Если инженерам-конструкторам и инженерам-

технологам закладывать во вновь создаваемый алмазный инструмент подобранную практически или расчётные значения зернистости, то величина зернистости будет определять производительность и качество обработки. При выборе большей зернистости будет высокая производительность, но низкое качество обработанной поверхности, а при выборе малых значений зернистости качество будет высоким, но производительность не высокой.

Для наилучшей обработки полимерных композиционных материалов показатель зернистости алмазного инструмента следует назначать с учётом рекомендаций, приведенных в [10].

Аналогично, по такому же принципу будет работать абразивный инструмент с абразивными зёрнами, имеющие схожие с алмазными зёрнами геометрические характеристики [11].

Причем это утверждение будет справедливо не только для свёрл и фрез, но и для других типов инструмента: например, для бесконечных абразивных лент, имеющих определенные перспективы внедрения на промышленных предприятиях, ведущих обработку композитов.

Таким образом, совокупность алмазных или абразивных зёрен способна эффективно осуществлять резание труднообрабатываемых ПКМ. Эффективность обработки будет всецело зависеть от рационального выбора зернистости, концентрации, связки алмазного порошка.

Дальнейшее совершенствование алмазно-абразивного инструмента может состоять в создании специальных структур расположения упорядоченных зёрен на рабочей поверхности инструмента [12-15].

Список литературы

1. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. пособие / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – М.: Университетская книга, 2006. – 400 с.
2. Котов С. А. Формирование отверстий излучением волоконного лазера в стеклокомпозиционном материале / С.А. Котов, Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов, А.Е. Ушаков и др. // Технология машиностроения. – 2018. – №6. – С. 32-38.

3. Котов С.А. Разработка технологии прецизионной резки и сверления конструкционных углепластиков излучением волоконного иттербиевого лазера: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2018. – 160 с.

4. Абляз Т.Р. Исследование процесса электроэрозионной обработки полимерных композиционных материалов /Т.Р. Абляз, К.Р. Муратов, Е.С. Шлыков и др.// СТИН – 2019. – № 9. – С. 29-32.

5. Грищенко Т.А. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов/ Т.А. Грищенко, Н.И. Мелюхов, В.О. Любушкин // Вестник инженерной школы ДВФУ- 2017. – № 2(31). – С. 49-55.

6. Котов С.А. Зависимость качества детали из термореактивного углепластика от вида обработки / С.А. Котов, В.В. Блинков, Д.И. Кондратюк // Авиационная промышленность. – 2016. – № 4. – С. 43–47.

7. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1987. – 176 с.

8. Дударев А.С. Конструкции свёрл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков/А.С. Дударев // Известия ТулГУ. – 2012. – №1. –С. 361-370.

9. Дударев А.С. Гипотезы, обосновывающие повышение стойкости алмазно-абразивного инструмента/А.С. Дударев, С.П. Захарова//Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – №4. – С. 74-91.

10. Дударев А.С. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов /А.С. Дударев, И.И. Сафонов, А.А. Стешин // Технология машиностроения. – 2014. – N 1. – С. 23-26.

11. Маслов Е.Н. Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом/Е.Н. Маслов, Н.В. Постникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 48 с.

12. Коротков А.Н. Исследование прочности шлифовальных инструментов с целью улучшения их режущей способности: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 1980. – 20 с.

13. Коротков В.А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов на основе использования зёрен с контролируемой формой и ориентацией. автореф. дис. канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2008. – 18 с.

14. Коротков В.А., Минкин Е.М. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зёрен с контролируемой формой/ В.А. Коротков, Е.М. Минкин// Обработка металлов. – 2014. – №2. С. 62 –77.

15. Люкшин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зёрен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2007. – 20 с.

References

1. Bataev A.A. Kompozitsionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye: ucheb. posobie /

A.A. Bataev, V.A. Bataev. – M.: Universitetskaya kniga, 2006. – 400 s.

2. Kotov S. A. Formirovanie otverstii izlucheniem volokonnogo lazera v steklokompozitsionnom materiale / S.A. Kotov, N.A. Liabin, I.N. Shiganov, A.E. Ushakov i dr. // *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. – 2018. – №6. – S. 32-38.

3. Kotov S.A. Razrabotka tekhnologii pretsizionnoi rezki i sverleniya konstruktivnykh ugleplastikov izlucheniem volokonnogo itterbievogo lazera: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Moskva, 2018. – 160 s.

4. Abliaz T.R. Issledovanie protsessa elektroerozionnoi obrabotki polimernykh kompozitnykh materialov / T.R. Abliaz, K.R. Muratov, E.S. Shlykov i dr. // *STIN* – 2019. – № 9. – S. 29-32.

5. Grishchenko T.A. Primenenie gidroabrazivnoi rezki pri obrabotke detalei iz polimernykh kompozitsionnykh materialov / T.A. Grishchenko, N.I. Meliukhov, V.O. Liubushkin // *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU* – 2017. – № 2(31). – S. 49-55.

6. Kotov S.A. Zavisimost' kachestva detali iz termoreaktivnogo ugleplastika ot vida obrabotki / S.A. Kotov, V.V. Blinkov, D.I. Kondratiuk // *Aviatsionnaya promyshlennost'*. – 2016. – № 4. – S. 43-47.

7. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov / A.A. Stepanov. – L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd., 1987. – 176 s.

8. Dudarev A.S. Konstruktsii sverl i frez dlya almazno-abrazivnoi obrabotki stekloplastikov i ugleplastikov / A.S. Dudarev // *Izvestiya TulGU*. – 2012. – №1. – S. 361-370.

9. Dudarev A.S. Gipotezy, obosnovyvaiushchie povysheniye stoikosti almazno-abrazivnogo instrumenta / A.S. Dudarev, S.P. Zakharova // *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. – 2016. – №4. – S. 74-91.

10. Dudarev A.S. Osobennosti mekhanicheskoi obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov / A.S. Dudarev, I.I. Safonov, A.A. Steshin // *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. – 2014. – N 1. – S. 23-26.

11. Maslov E.N. Osnovnye napravleniya v razvitiye teorii rezaniya abrazivnym, almaznym i el'bovym instrumentom / E.N. Maslov, N.V. Postnikova. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 48 s.

12. Korotkov A.N. Issledovanie prochnosti shlifoval'nykh instrumentov s tsel'yu uluchsheniya ikh rezhushechnoy sposobnosti: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Moskva, 1980. – 20 s.

13. Korotkov V.A. Povysheniye ekspluatatsionnykh vozmozhnostey otreznykh shlifoval'nykh krugov na osnove ispol'zovaniya zeren s kontroliruemoy formoy i orientatsiei. avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Tomsk: TPU, 2008. – 18 s.

14. Korotkov V.A., Minkin E.M. Geometriya i napriazhennoye sostoyaniye orientirovannykh shlifoval'nykh zeren s kontroliruemoy formoy / V.A. Korotkov, E.M. Minkin // *Obrabotka metallov*. – 2014. – №2. S. 62–77.

15. Liukshin V.S. Povysheniye rabotosposobnosti shlifoval'nykh lent putem ispol'zovaniya zeren s kontroliruemoy formoy i orientatsiei: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Tomsk: TPU, 2007. – 20 s.

УДК 621.454

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ТАНГЕНЦИАЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕНТОЧНОМ РОТАЦИОННОМ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1

С.М. Братан¹, Ю.К. Новоселов¹, Т.В. Стадник¹, А.С. Часовитина¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В настоящее время, при изготовлении узлов и механизмов судов, летательных аппаратов и других технологических машин, промышленных роботов используются длинномерные изделия из титанового сплава ВТЗ-1, для обработки которых разработан комплекс для ленточного ротационного шлифования. Выходные показатели процесса ленточного ротационного шлифования зависят от сил резания, возникающих в процессе обработки. По силам резания осуществляют диагностику стабильности протекания процесса, рассчитывают значения показателей шероховатости поверхности, температур и режимы резания по уравнению баланса перемещений. Статья посвящена получению математической модели, устанавливающей взаимосвязь между тангенциальной составляющей силы резания и режимами резания при ленточном ротационном шлифовании титанового сплава ВТЗ-1.

Ключевые слова: ленточное ротационное шлифование, абразивная лента, сила резания, титановый сплав

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES ON THE TANGENTIAL COMPONENT OF THE CUTTING FORCE DURING BELT ROTARY GRINDING OF BLANKS MADE OF TITANIUM ALLOY VT3-1

S.M. Bratan¹, Yu.K. Novoselov¹, T.V. Stadnik¹, A.S. Chasovitina¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

These days, in the manufacture of units and mechanisms of ships, aircraft and other technological machines, industrial robots, long-sized products from VT3-1 (Standart GOST-R) titanium alloy are used, for the processing of which a complex for belt rotary grinding has been developed. The outcome measures of the rotary belt grinding process depend on the cutting forces generated during the processing process. According to cutting forces, process stability is diagnosed, values of surface roughness indices, temperatures and cutting modes are calculated according to displacement balance equation. The article is devoted to obtaining a mathematical model establishing the relationship between the tangential component of the cutting force and cutting modes during belt rotary grinding of VT3-1 (Standart GOST-R) titanium alloy.

Keywords: rotary belt grinding, abrasive belt, cutting force, titanium alloy

В современной технике, во многих отраслях промышленности таких как авиастроение, ракетостроение, судостроении, приборостроении, а также химической и нефтехимической промышленности в качестве конструкционных материалов находят широкое применение титановые сплавы. Титановые сплавы обладают высокой химической активностью и вязкостью, что приводит к образованию наростов. Широкое распространение получил титановый сплав

ВТЗ-1. В виду высокой легкости, прочности и твердости сплав используется для изготовления различного металлопроката. [1-5].

В настоящее время, при изготовлении узлов и механизмов судов, летательных аппаратов и других технологических машин, промышленных роботов используются длинномерные изделия из титановых сплавов, в частности из сплава ВТЗ-1. К длинномерным изделиям относят изделия, изготовленные из прутков, проволоки и трубных

заготовок, прямолинейной и криволинейной формы, которые используются в качестве направляющих сварочных роботов, конвейеров и т.п., работающих в агрессивных и высокотемпературных средах.

Для окончательной обработки ряда таких изделий используются методы абразивно-алмазной обработки [6-10]. При обработке подобных изделий возникает ряд сложностей, связанных с невозможностью вращения данных деталей в процессе обработки, особенно это касается изделий криволинейной формы. Поэтому для обработки длинномерных осесимметричных нежестких деталей, где вращение обрабатываемой детали невозможно или затруднительно, таких как прокат, трубы, проволока прямолинейной и криволинейной форм наиболее оптимальной схемой обработки, с точки зрения достижения низкой шероховатости поверхности, предложен способ ротационного ленточного шлифования [11-14]. Для обработки криволинейных (радиусных) заготовок на кафедре «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «СевГУ» специально разработан комплекс для ленточного ротационного шлифования (рис. 1), который состоит из устройства ленточного ротационного шлифования 1 и устройства подачи радиусной заготовки 2.

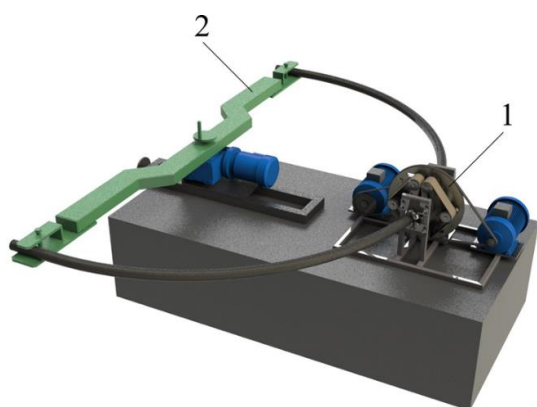


Рис. 1 - Модель комплекса для ленточного ротационного шлифования радиусных заготовок:
1 – устройство ленточного ротационного шлифования; 2 – устройство подачи радиусной заготовки

Принцип работы такого устройства заключается в следующем: радиусная заготовка закрепляется в поворотный механизм, ось

вращения которого устанавливается от оси устройства ленточного шлифования на расстоянии равному радиусу изгиба заготовки. Поворотный механизм с заготовкой в ручном режиме устанавливается в начальное положение – максимально близко к краю заготовки. Включается вращение ленты и поворотного механизма. При необходимости обратного движения заготовки включается реверсивное маятниковое движение.

Известно, что выходные показатели процесса ленточного ротационного шлифования имеют корреляционную связь с силами резания, возникающими в процессе обработки. По силам резания осуществляют диагностику стабильности протекания процесса, рассчитывают значения показателей шероховатости поверхности и режимов резания по уравнению баланса перемещений. Согласно литературным данным [15] на процесс ленточного ротационного шлифования существенно влияние оказывают зернистость и скорость ленты, а также сила прижима ленты, которые целесообразно использовать в качестве варьирующих переменных факторов. На основании вышеизложенного, целью данной работы является получение математической модели тангенциальной составляющей силы резания в зависимости от скорости ленты, ее зернистости и радиальной составляющей силы резания при ленточном ротационном шлифовании заготовок из титанового сплава ВТ3-1.

Для построения моделей были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводили на образцах круглого сечения, диаметром 10-50 мм, нормальной точности изготовления, длиной 3000 мм) из титанового сплава ВТ3-1.

Для измерения сил резания применяли динамометрические центра (передний и задний), снабженные проволочными тензорезисторами (датчиками сопротивления) между которыми закреплена заготовка. Два динамометрических центра позволяют фиксировать силы резания в процессе шлифования при любом положении шлифовальной ленты относительно обрабатываемой детали. Проволочные датчики, наклеенные на вертикальных плоскостях переднего и заднего

центров, соединены в один мост и используются для измерения силы P_y (рис. 2). Датчики, наклеенные на горизонтальных плоскостях обоих центров, используются для измерения силы P_z .

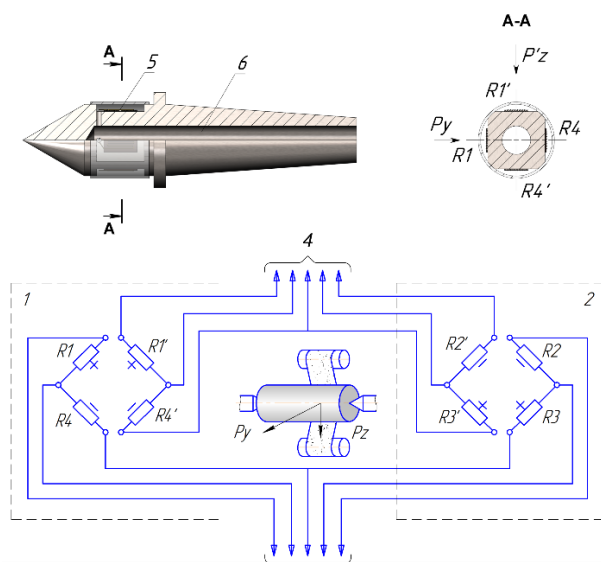


Схема измерения включает динамометрические центры, усилитель, аналого-цифровой преобразователь ЛА-50USB, подключенный к персональному компьютеру по известной методике. Тарировка тензометрических центров осуществлялась статическим нагружением. Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Тарировочный график имел линейный характер. Общая погрешность при использовании данной методики составляет 10%.

Продольное перемещение динамометрических центров, с закрепленной между ними заготовкой, в процессе измерения осуществляется по направляющим на станине посредством зубчатой рейки и шагового электродвигателя (рис. 3).

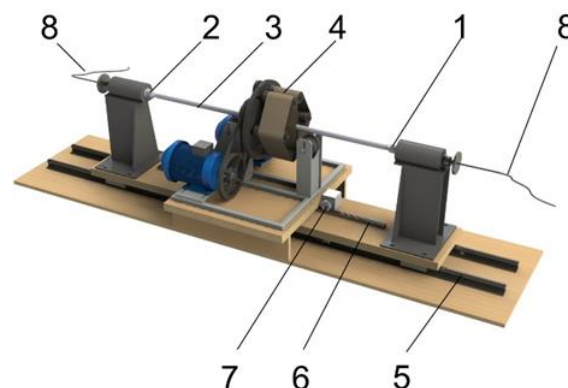


Рис.2 - Схема установки для измерения сил резания: 1, 2 — передний и задний тензометрические центра соответственно; 3 — заготовка; 4 — установка для ротационного ленточного шлифования; 5 — направляющие станины; 6 — зубчатая рейка; 7 — шаговый электродвигатель; 8 — провода, ведущие к прибору для измерения сил резания

Согласно анализа литературных данных [15] для моделирования значений составляющей силы резания P_z от переменных факторов: радиальной составляющей силы резания $-P_y$, скорости ленты $-V_l$ и зернистости абразивной ленты $-X_H$ была принята регрессионная зависимость степенного вида:

$$P_z = C_{P_z} \cdot P_y^{\alpha_1} \cdot V_l^{\alpha_2} \cdot X_H^{\alpha_3}, \quad (1)$$

где C_{P_z} — коэффициент; P_y — радиальная составляющая силы резания; V_l — скорость ленты; X_H — зернистость абразивной ленты; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — показатели степени.

После логарифмирования данное уравнение 1 принимает вид:

$$\ln P_z = \ln C + \ln P_y + \ln V_l + \ln X_H$$

Проверка гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента выполняется с помощью полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3,$$

где y – это $\ln P_z$; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов; b_1, b_2, b_3 – коэффициенты параметров модели; b_0 – свободный член.

Кодированные значения факторов определяли по выражению:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_i^e)}{\ln \tilde{x}_i^e - \ln \tilde{x}_i^H} + 1,$$

где x_i – кодированное значение i -того фактора; $\tilde{x}_i$ – натуральное значение i -того фактора; $\tilde{x}_i^e$ – натуральное значение верхнего уровня i -того фактора; $\tilde{x}_i^H$ – натуральное значение нижнего уровня i -того фактора.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость тангенциальной составляющей силы резания от скорости движения ленты, ее зернистости и радиальной составляющей силы резания:

$$P_z = 5,7 \cdot P_y^{0,784} \cdot V_l^{0,03} \cdot X_H^{-0,612} \quad (2)$$

На рис. 4, 5 приведены иллюстрации изменения силы P_z от вышерассмотренных параметров.

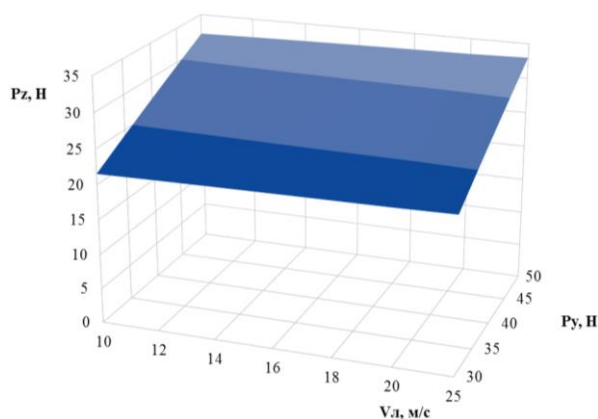


Рис. 4 - Влияние радиальной составляющей силы резания и скорости резания на тангенциальную составляющую силы резания при обработке материала ВТЗ-1 абразивной лентой зернистостью 10.

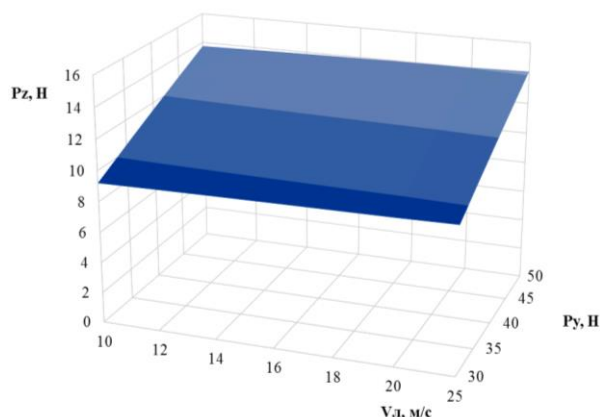


Рис. 5 - Влияние радиальной составляющей силы резания и скорости резания на тангенциальную составляющую силы резания при обработке материала ВТЗ-1 абразивной лентой зернистостью 40.

Полученная зависимость (2) позволяет дифференцированно оценить влияние скорости ленты, ее зернистости, радиальной составляющей силы резания на тангенциальную составляющую силы резания и судить о состоянии процесса ленточного ротационного шлифования.

Список литературы

1. Горынин И. В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М: Машиностроение, 1990. – 400 с.
2. Томашов Н.Д. Титан и коррозионностойкие сплавы на его основе. – М.: Металлургия, 1985. – 81 с.
3. Бубнов В.А. Титан и его сплавы в машиностроении / В.А Бубнов, А.Н. Князев // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 3 (42). – С. 92-96.
4. Егорова Ю.Б. Титановые сплавы для автомобилестроения / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.Н. Егоров // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 1137-1146.
5. Александров В.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар и др. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
6. Investigation of the mechanism of interaction of cutting fluids with the material of the workpiece when grinding titanium parts in the presence of inorganic salt Bratan, S., Stadnik, T., Roshchupkin, S. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, стр. 2048–2051.
7. Influence of the tool working surface state on evaluation of the forming filter parameters Bratan, S.M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 709(2), 022009.

8. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process Bratan, S., Bogutsky, B., Roshchupkin, S. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, 0(9783319956299), стр. 1759–1769.

9. Flat grinding model, considering internal dynamics of the process Bratan, S., Vladetskaya, E. MATEC Web of Conferences, 2018, 224, 01002.

10. Synthesis of lunberger stochastic observer for estimation of the grinding operation state Bratan, S., Roshchupkin, S. MATEC Web of Conferences, 2018, 224, 01133.

11. Братан С.М. Баланс перемещений в технологической системе при ленточном ротационном шлифовании / С.М. Братан, Т.В. Стадник, А.Г. Колесов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып. 8., ч. 1. – С. 270–275.

12. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process Bratan, S., Kolesov, A., Roshchupkin, S., Stadnik, T. MATEC Web of Conferences, 2017, 129, 01078

13. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys Bratan, S., Stadnik, T., Golovin, V. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, pp. 2013–2018

14. Шиляев С.А. Анализ конструктивных и технологических параметров устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования на основе исследований динамики относительного движения абразивной ленты / С.А. Шиляев С.А., А.Г. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 6. – С. 12–20.

15. Шиляев С.А. Исследование технологических показателей процесса ротационного ленточного шлифования и получение математических зависимостей для количественного анализа условий резания / С.А. Шиляев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (38). – С. 23–26.

References

1. Gorynin I. V. Titan v mashinostroenii / I.V. Gorynin, B.B. Chechulin. – М: Mashinostroenie, 1990. – 400 s.

2. Tomashov N.D. Titan i korrozionnostoikie splavy na ego osnove. – М.: Metallurgiya, 1985. — 81 s.

3. Bubnov V.A. Titan i ego splavy v mashinostroenii / V.A. Bubnov, A.N. Kniazev // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2016. – № 3 (42). – S. 92–96.

4. Egorova Iu.B. Titanovye splavy dlia avtomobilestroenii / Iu.B. Egorova, L.V. Davydenko, S.B. Be-

lova, E.N. Egorov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. – 2013. – № 3. – S. 1137–1146.

5. Aleksandrov V.K. Polufabrikaty iz titanovykh splavov/ V.K. Aleksandrov, N.F. Anoshkin, G.A. Bochvar i dr. – М.: Metallurgiya, 1979. – 512 s.

6. Investigation of the mechanism of interaction of cutting fluids with the material of the workpiece when grinding titanium parts in the presence of inorganic salt Bratan, S., Stadnik, T., Roshchupkin, S. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, стр. 2048–2051.

7. Influence of the tool working surface state on evaluation of the forming filter parameters Bratan, S.M. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 709(2), 022009.

8. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process Bratan, S., Bogutsky, B., Roshchupkin, S. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, 0(9783319956299), стр. 1759–1769.

9. Flat grinding model, considering internal dynamics of the process Bratan, S., Vladetskaya, E. MATEC Web of Conferences, 2018, 224, 01002.

10. Synthesis of lunberger stochastic observer for estimation of the grinding operation state Bratan, S., Roshchupkin, S. MATEC Web of Conferences, 2018, 224, 01133.

11. Bratan S.M. Balans peremeshchenii v tekhnologicheskoi sisteme pri lentochnom rotatsionnom shlifovanii / S.M. Bratan, T.V. Stadnik, A.G. Kolesov // Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – Vyp. 8., ch. 1. – S. 270–275.

12. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process Bratan, S., Kolesov, A., Roshchupkin, S., Stadnik, T. MATEC Web of Conferences, 2017, 129, 01078

13. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys Bratan, S., Stadnik, T., Golovin, V. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, pp. 2013–2018

14. Shiliaev S.A. Analiz konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov ustroistva rotatsionnogo lentochnogo okhvatyvaiushchego shlifovaniia na osnove issledovaniia dinamiki otnositel'nogo dvizheniia abrazi-vnoi lentyy / S.A. Shiliaev S.A., A.G. Ivanov // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauma-na. – 2011. – № 6. – S. 12–20.

15. Shiliaev S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh pokazatelei protsessov rotatsionnogo lentochnogo shlifovaniia i poluchenie matematicheskikh zavisimosti dlia kolichestvennogo analiza uslovii rezaniia/ S.A. Shiliaev // Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2008. – № 2 (38). – S. 23–26.

УДК 621.923

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Э.Д. Умеров¹

¹ ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье изложены основные тенденции при моделировании динамики процесса сверления. Установлено, что процесс формирования поверхности отверстия является сложным физическим процессом, на который оказывает существенное влияние режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, деформационные процессы и вибрационная составляющая процесса резания. Для повышения производительности процесса сверления необходимо совершенствование существующих методов назначения режимов резания или же разработке новых, позволяющих уменьшить время обработки детали и повысить качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: процесс сверления, режущий инструмент, обработка, режимы резания, технологическая система, математическая модель.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS IN MODELING THE DRILL-ING PROCESS

E.D. Umerov¹

¹ Fevzi Yakubov Crimean engineering and pedagogical university, Simferopol, Russian Federation

Abstract

The article describes the main trends in modeling the dynamics of the drilling process. It is established that the process of forming the hole surface is a complex physical process, which is significantly influenced by cutting modes, geometric parameters of the cutting tool, deformation processes and the vibration component of the cutting process. To increase the productivity of the drilling process, it is necessary to improve existing methods for assigning cutting modes or to develop new ones that reduce the processing time of the part and improve the quality of the treated surface.

Keywords: drilling process, cutting tool, processing, cutting modes, technological system, mathematical model

Исследованиям, направленные на моделирование динамики процесса сверления, посвящены ряд работ как отечественных, так и зарубежных авторов, результат которых получил два направления: 1) повышение качества и точности обработанных поверхностей путем назначения благоприятных режимов резания, не приводящих к вибрациям в процессе резания; 2) обработка глубоких отверстий за счет применения вибрационного дробления стружки [1].

Известны подходы для изучения процесса сверления, в которых моделирование процесса резания происходит путем произведения силы резания на площадь слоя срезаемой стружки. Однако при одинаковой величине подачи и частоте вращения шпин-

деля, на сверло, имеющую различную геометрию, действуют различные силы резания при одинаковой толщине слоя стружки, что влияет на производительность процесса.

В других методах предлагается режущие кромки сверла разделить на определенное количество сегментов, рассматривая их отдельно и определяя силы резания на каждом участке, что является эффективным методом по сравнению с выше рассмотренным. Полученные результаты будут действительны для рассматриваемой геометрии сверла и не требуют проведения экспериментов. Это в свою очередь позволяет исследовать различные геометрии сверла на силы резания, а также сверление отверстий в деталях с наклонной плоскостью.

Главные режущие кромки сверла воспринимают большую часть тангенциальной силы и в меньшей радиальную и осевую составляющие. Поперечная режущая кромка оказывает влияние на точность центрирования, на которую приходится основная нагрузка осевой силы. При моделировании процесса сверления поперечную кромку учитывают только для расчета осевой силы, а наибольший интерес представляют главные режущие кромки.

При моделировании необходимо также учитывать влияние ленточек сверла, которые формируют качество обработанной поверхности и оказывающие незначительное влияние на величину крутящего момента.

Наличие вибраций в процессе сверления приводит к крутильно-осевым колебаниям сверла, что оказывает негативное влияние на качество поверхности отверстия.

Цель статьи – провести анализ основных направлений при моделировании процесса сверления.

В работе [2] приводятся исследования, посвященные изучению отклонения формы отверстий от влияния асимметрии режущих кромок сверла. При удалении объема материала на операциях сверления, форма отверстия может иметь отклонение от округлости, увеличенный диаметр, отклоняться от оси вращения шпинделя, которые зависят от действующих на сверло сил резания [3].

Разработанная математическая модель, приведенная Lee в работе [4] описывает формирование отверстия сверлом, имеющую многоугольную форму (огранку), примеры которых представлены на рис. 1.

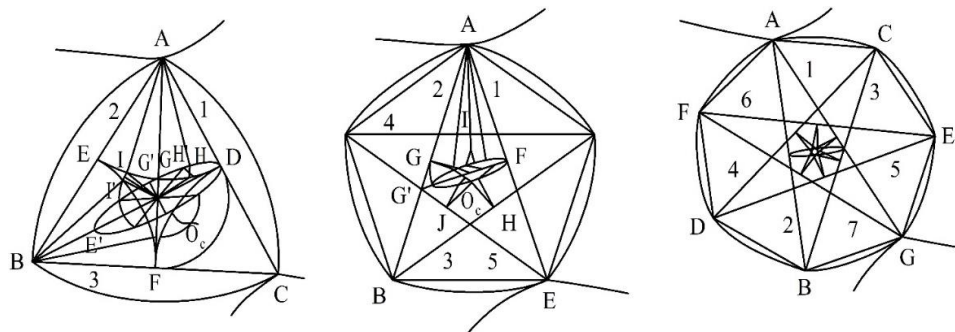


Рис. 1 - Формы полученных отверстий при сверлении [2]:
а – треугольная форма; б – пятиугольная форма; в – семиугольная форма.

Автором предлагается определять радиус отверстия по зависимости:

$$R_n(t) = [X_1^2(t) + Y_1^2(t)]^{1/2} = \left\{ e^2(t) + r^2(t) + 2e(t)r(t) \cos \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_s} + 1 \right) \omega_s t + (\varepsilon + \psi) \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Количество сторон многоугольника определится уравнением:

$$N_p = \frac{\omega_r}{\omega_s} + 1. \quad (2)$$

На увеличение числа сторон много-

угольника оказывает влияние глубина просверленного отверстия, а также максимальная частота радиального смещения сверла [2]. При этом не учитывается поведение технологической системы.

В работе [5] предложен метод по определению коэффициента резания на основе калибровочных тестов и разработаны аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать радиальное смещение сверла и силы резания при сверлении.

В дискретной форме передаточная функция шпинделя станка и режущего инструмента запишется как:

$$G(z) = \sum_{k=1}^n R_k \left(\frac{z}{z - e^{s_{1,k}T}} - \frac{z}{z - e^{s_{2,k}T}} \right) \quad (3)$$

где $S_{1,k}$ и $S_{2,k}$ – комплексные сопряженные корни рассматриваемой передаточной функции k -ой гармоники.

Полученная передаточная функция позволяет рассчитывать силы резания P_x и P_y на каждый угол поворота сверла при перемещении инструмента в направлении X и Y , исходя из сил резания, полученных экспериментальным путем.

Следовательно, радиальные смещения сверла определяются по зависимости:

$$\begin{aligned} X(z) &= G_X(z) \cdot P_X(z) \\ Y(z) &= G_Y(z) \cdot P_Y(z) \end{aligned} \quad (4)$$

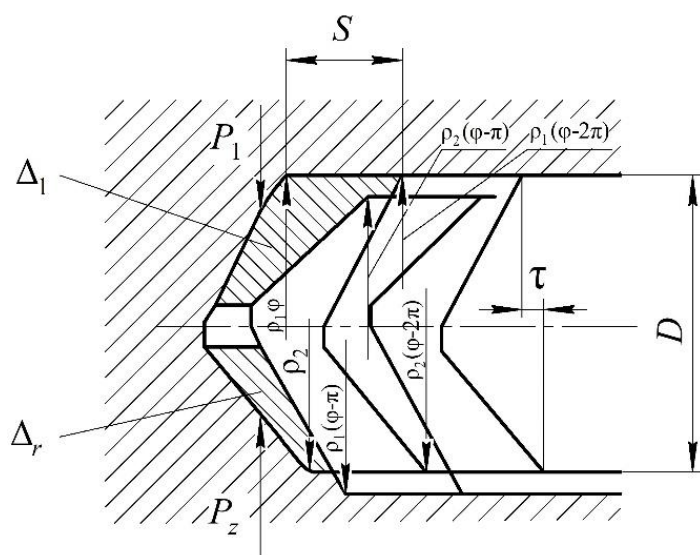


Рис. 2 - Расчетная схема и математическая модель процесса сверления [7].

В работе [8] Салабаев Д.Е. приводит разработанную математическую модель и структурную схему процесса сверления с учетом продольного смещения инструмента, резания по следу, с изменяемой жесткостью технологической системы и коэффициентов координатных связей. Проведенные исследования способствуют снижению шероховатости обработанной поверхности, достигаемая за счет регулирования крутильных колебаний, снижения сил резания и амплитуды колебаний.

В работе [9] Сергеев С.В. приводит ма-

Аналитические зависимости (3) и (4) позволяют предсказать качество обработанных поверхностей и радиальные смещения инструмента на основе сил резания, геометрии сверла и состояние технологической системы.

В работе [6] приведены математические модели процесса сверления на основе изменения величины подачи, разработанные Дерябиным И.П. Им же в работе [7] приводится расчетная схема и математическая модель процесса обработки, при сверлении с большими величинами подачи инструмента, представленная на рис. 2.

$$\begin{aligned} \rho(\varphi) &= \frac{A + 2 \cdot h \cdot O_s \cdot (K_2 - K_1) \cdot \cos(\varphi_n)}{C} - \frac{B \cdot \rho(\varphi - \pi)}{C} \\ A &= h \frac{S}{2} \cdot (K_2 - K_1) + h \cdot \tau \cdot (K_2 + K_1) + \frac{D \cdot h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{D \cdot J}{2}; \\ B &= \frac{h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad C = J + \frac{h \cdot (K_2 + K_1)}{\operatorname{tg} \varphi}; \\ h &= \frac{D - D_0}{2}. \end{aligned}$$

тематическую модель механической обработки отверстий, учитывающая динамику продольных и кинематику поперечных колебаний сверла, схема которой представлена на рис. 3.

В работах [10, 11] автора Altintas Y. приводятся модели динамики процесса сверления, учитывающие четыре степени свободы сверла (осевое перемещение, два поперечных смещения и вращение инструмента), расчетная схема которой представлена на рис. 4.

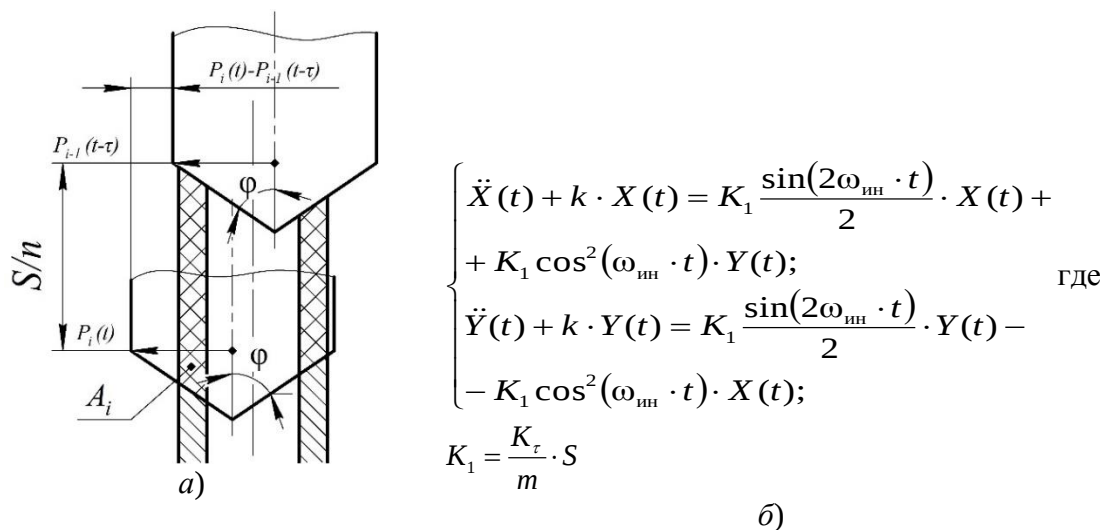


Рис. 3 - Расчетная схема движения сверла (а) и ее динамическая модель поперечных движений (б) [9].

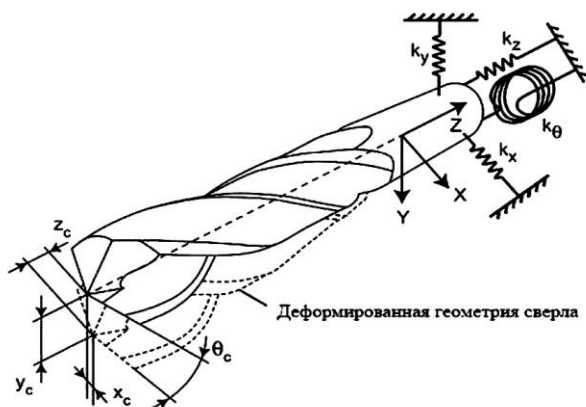


Рис. 4 - Расчетная модель динамики спирально-го сверла.

Предложенная модель является наиболее полной из рассмотренных в литературных источниках, позволяющая построить диаграммы с границами устойчивого резания от технологических параметров.

В работе [12] приводится динамическая модель устойчивого резания, учитывающая нелинейные системы, крутильные, поперечные и осевые вибрации инструмента, которые можно представить в векторно-матричном виде:

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c(t) \\ \ddot{y}_c(t) \\ \ddot{z}_c(t) \\ \ddot{\theta}_c(t) \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{y}_c(t) \\ \dot{z}_c(t) \\ \dot{\theta}_c(t) \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x_c(t) \\ y_c(t) \\ z_c(t) \\ \theta_c(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_x(t) \\ P_y(t) \\ P_z(t) \\ M_{кр}(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

где $[M]$ – матрица масс;

$[C]$ – матрица демпфирования;

$[K]$ – матрица жесткости системы;

$x_c(t)$ – перемещение сверла в направлении оси x ;

$y_c(t)$ – перемещение сверла в направлении оси y ;

$z_c(t)$ – осевое перемещение сверла;

$\theta_c(t)$ – угол закручивания сверла;

$F_x(t)$ – боковая сила, действующая на сверло по оси x ;

$F_y(t)$ – боковая сила, действующая на сверло по оси y ;

$F_z(t)$ – осевая сила, действующая на сверло;

$T_c(t)$ – крутящий момент, действующее на сверло.

Силы резания в правой части уравнения (5) зависят от толщины срезаемого слоя и эффекта запаздывания.

Можно сказать, что данная модель

является наиболее полно отражающей законы частичной устойчивости, по сравнению с другими моделями.

В работе [13] на основе экспериментальных исследований процесса глубокого сверления было обнаружено, что вибрации возникаемые в процессе резания возможно подавить за счет применения динамического демпфера и геометрии режущей части сверла, где последняя не всегда эффективна.

Выводы.

1. Процесс формирования поверхности отверстия является сложным физическим процессом, на который оказывает существенное влияние режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, деформационные процессы и вибрационная составляющая процесса резания.

2. Повышение производительности процесса сверления может достигнута путем совершенствования существующих методов назначения режимов резания или же разработке новых, позволяющих уменьшить время обработки детали и повысить качество обработанной поверхности.

Также повышение производительности может быть достигнута за счет повышения стойкости режущего инструмента и уменьшением количества геометрических дефектов, связанных с издержками на их исправление.

Список литературы

1. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопровильных деталей: автореф. дис. на соиск уч. ст. канд. техн. наук / И.А. Киселев. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 21 с.
2. Genta G. Dynamics of Rotating Systems / G. Genta // Springer. – 2005. Vol. 658.
3. Haggerty W. A. Effects of Point Geometry and Dimensional Symmetry on Drill Performance / Haggerty W. A. // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1961. – Vol.1. – P. 41-58.
4. Lee S.J. An analysis of the drill wandering motion / S.J. Lee, Eman K.F., Wu S.M. // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1986. – Vol. 109. – Issue 4. – P. 297-305.
5. Pirtini M. Forces and hole quality in drilling /

M. Pirtini, I. Lazoglu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 99. – P. 1271-1281.

6. Дерябин И.П. Исследование влияния перемены сверла на точность обработки отверстий / И.П. Дерябин, С.И. Павличук // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. – Челябинск, 2014. – С. 1437-1440.

7. Дерябин И.П. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе компьютерного моделирования процессов обработки отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. на соиск уч. ст. канд. техн. наук / И.П. Дерябин. – Челябинск, 1996. – 22 с.

8. Салабаев Д.Е. Повышение точности при сверлении отверстий путем динамической настройки технологической системы: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук / Д.Е. Салабаев – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2005. – 19 с.

9. Сергеев С.В. Повышение точности при сверлении отверстий спиральными сверлами путем управления динамическими составляющими процесса: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / С.В. Сергеев. – Челябинск, ЧГТУ. 1995. – 19 с.

10. Ahmadi K. Identification of Machining Process Damping Using Output-Only Modal Analysis / K. Ahmadi, Y. Altintas // Journal of Manufacturing Science and Engineering – 2014. – Vol. 136. №5. – P. 1-13.

11. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas – Cambridge University Press. – 2012. – 366 p.

12. Roukema J. C. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation / J. C. Roukema, Y. Altintas // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – P. 1455-1473.

13. Ema S. Chatter vibration in drilling / S. Ema, H. Fujii, E. Marui // Journal of Engineering for Industry. – 1998. – №110. – P. 309-314.

References

1. Kiselev I.A. Modelirovanie dinamiki protsessa frezirovaniia tonkostennykh slozhnopro-fil'nykh detalei: avtoref. dis. na soisk uch. st. kand. tekhn. nauk / I.A. Kiselev. – MGTU im. N.E. Ba-umana, 2013. – 21 s.
2. Genta G. Dynamics of Rotating Systems / G. Genta // Springer. – 2005. Vol. 658.
3. Haggerty W. A. Effects of Point Geometry and Dimensional Symmetry on Drill Performance / Haggerty W. A. // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1961. – Vol.1. – P. 41-58.
4. Lee S.J. An analysis of the drill wandering motion / S.J. Lee, Eman K.F., Wu S.M. // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1986. – Vol. 109. – Issue 4. – P. 297-305.
5. Pirtini M. Forces and hole quality in drilling /

M. Pirtini, I. Lazoglu // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 99. – P. 1271-1281.

6. Deriabin I.P. Issledovanie vliianiia pere-mychki sverla na tochnost' obrabotki otverstii / I.P. Deriabin, S.I. Pavlichuk // *Nauka IuUrGU: ma-terialy 66-i nauchnoi konferentsii*. –Cheliabinsk, 2014. – S. 1437-1440.

7. Deriabin I.P. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na osno-ve komp'iuternogo modelirovaniia protsessov obra-botki otverstii kontsevyimi mernymi instrumenta-mi: avtoref. dis. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk / I.P. Deriabin. – Cheliabinsk, 1996. – 22 s.

8. Salabaev D.E. Povyshenie tochnosti pri sverlenii otverstii putem dinamicheskoi nastroiки tekhnologicheskoi sistemy: avtoref. dis. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk / D.E. Salabaev – Tol'iatti: Tol'iattinskii gosudarstvennyi universitet, 2005. – 19 s.

9. Sergeev S.V. Povyshenie tochnosti pri sverlenii otverstii spiral'nymi sverlami putem upravleniia dinamicheskimi sostavliaiushchimi protses-sa: avtoref. dis. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk / S.V. Sergeev. – Cheliabinsk, ChGTU. 1995. – 19 s.

10. Ahmadi K. Identification of Machining Process Damping Using Output-Only Modal Analysis / K. Ahmadi, Y. Altintas // *Journal of Manufacturing Science and Engineering* – 2014. – Vol. 136. №5. – P. 1-13.

11. Altintas, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design* / Y. Altintas – Cambridge University Press. – 2012. – 366 r.

12. Roukema J. C. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation / J. C. Roukema, Y. Altintas // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – P. 1455-1473.

13. Ema S. Chatter vibration in drilling / S. Ema, H. Fujii, E. Marui // *Journal of Engineering for Industry*. – 1998. – №110. – P. 309-314.

УДК 621. 923

МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТРУКТУР (МПС) В ГИБРИДНЫХ КОМПОНОВКАХ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.О. Харченко, А.А. Харченко, А. С. Часовитина¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье рассмотрены принципы построения современного резьбонарезного оборудования на основе механизмов параллельных структур. Благодаря определению оптимальной структуры был выявлен вариант комбинированного МПС с возможностью одновременного изменения длины штанг и координат опорных шарниров, обеспечивающий выполнение значительного количества технологических функций на одном рабочем месте за одну установку детали. Описан принцип работы полученного гибридного вертикального резьбонарезного станка с комбинированными МПС модульной конструкции, в которой исполнительный орган может совершать сложное пространственное движение. Создана на основе морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза также гибридная компоновка резьбонарезного станка с шестипозиционной револьверной головкой и комбинированными МПС. Использование устройств на основе сочетания признаков и преимуществ механизмов типов «глайд» и «под» открывает возможности создания новых гибридных компоновок резьбонарезных станков с комбинированными МПС для выполнения задач качественной обработки деталей и существенного расширения технологических возможностей. Гибридные компоновки представленных резьбонарезных станков с комбинированными МПС сохраняют функции выполнения формообразующих движений за резьбонарезной головкой (как в классическом варианте), а функции вспомогательных и установочных перемещений – за комбинированными МПС.

Ключевые слова: резьбообработка, механизмы параллельных структур (МПС), гибридный вертикальный резьбонарезной станок с комбинированными МПС, анализ и синтез, резьбонарезной станок с шестипозиционной револьверной головкой и комбинированными МПС.

MECHANISMS OF PARALLEL STRUCTURES (MPS) IN HYBRID LINES OF THREADING EQUIPMENT

A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko, A. S. Chasovitina¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses the principles of constructing modern threading equipment based on mechanisms of parallel structures. Due to the determination of the optimal structure, a variant of the combined MPS was identified with the possibility of simultaneously changing the length of the rods and the coordinates of the supporting joints, which ensures the performance of a significant number of technological functions at one workplace for one installation of the part. The principle of operation of the obtained hybrid vertical threading machine with combined MPS of modular design, in which the executive body can perform complex spatial movement, is described. A hybrid layout of a threading machine with a six-position turret and combined MPS was also created on the basis of morphological analysis and structural-layout synthesis. The use of devices based on a combination of features and advantages of mechanisms of the "glide" and "pod" types opens up the possibility of creating new hybrid layouts of thread-cutting machines with combined MPS for performing the tasks of high-quality processing of parts and a significant expansion of technological capabilities. Hybrid layouts of the presented threading machines with combined MPS retain the functions of performing shaping movements behind the threading head (as in the classic version), and the functions of auxiliary and positioning movements - behind the combined MPS.

Keywords: threading, parallel structure mechanisms (MPS), hybrid vertical threading machine with combined MPS, analysis and synthesis, threading machine with a six-position turret and combined MPS.

Решение задачи повышения производительности труда и улучшения качества машиностроительной продукции при мини-

мальных затратах связано с постоянным развитием и расширением возможностей технических систем (ТС) современных станков.

При проектировании нового объекта используются как новые, так и известные технические решения.

На сегодня перспективной тенденцией развития станков является оснащение кинематических цепей каждого из формообразующих движений собственным приводом (шаговые электродвигатели, цифровые пневмо- или гидродвигатели), а также расширение технологических возможностей оборудования с механизмами параллельных структур (МПС) благодаря использованию модульного принципа построения компоновок.

В научно-технических источниках приводится значительное количество работ, посвященных исследованиям, конструктивному усовершенствованию, выбору оптимальных геометрических параметров структур станков на основе МПС. Приводятся результаты исследований показателей статической и динамической точности такого оборудования, виброустойчивости технологических систем различного назначения, однако проблема создания резьбонарезного станочного оборудования повышенной точности на основе МПС до настоящего времени не рассматривалась и недостаточно изучена.

Учитывая вышесказанное, задача создания резьбонарезного станка с МПС для высокопроизводительного получения точных мелкоразмерных внутренних резьб на основе методологии анализа и синтеза его структурных вариантов является весьма актуальной.

Непрерывное развитие мировой экономики и рост конкурентоспособности в машиностроении обуславливают усовершенствование средств и методов производства станочного оборудования. Это позволяет обеспечивать высокое качество продукции на уровне передовых фирм-производителей. Современное производство должно соответствовать следующим требованиям: быстроперенастраиваемость, многономенклатурность и гибкость технологических систем. Процентное соотношение количества выпущенного оборудования такого рода в разных странах показано на рис. 1.

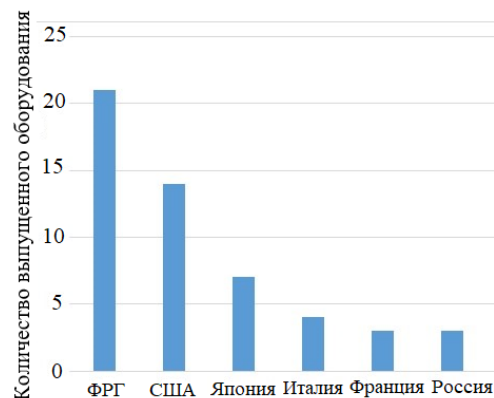


Рис. 1. Процентное соотношение количества выпущенного оборудования с МПС в развитых странах

Создание гибких технологических систем невозможно без автоматизации производства в целом. Сам же процесс автоматизации является сложным и многоуровневым и представляет комплекс мер, направленных на увеличение производительности для получения положительного экономического эффекта. Список задач автоматизации постоянно расширяется в процессе производства, так как возникают новые требования: коррекция погрешностей установления заготовок; обеспечение требуемой точности позиционирования исполнительного органа с инструментом; адаптивность системы управления режимами функционирования процесса; определение момента срабатывания соответствующего инструмента, а также выявление его текущего состояния; контроль качества процесса обработки; диагностика текущего состояния всех элементов технологической системы. Для выполнения вышеописанных задач необходимо использовать соответствующее информационное обеспечение.

Наличие многократного переоборудования деталей, большого количества транспортных межоперационных процессов отвечает исторически сложившимся традициям классификации оборудования по виду осуществляемой обработки, но не современным требованиям к станочным комплексам. Использование новых технологий возможно только при применении технологического оборудования с большой концентрацией возможных операций. Такое оборудование

обеспечивает выполнение значительного количества технологических методов на одном рабочем месте за одну установку детали. Часто узлы станочного оборудования имеют конкретное единственное функциональное назначение, поэтому конструкции станков такого типа для осуществления различных технологических приемов будут обладать либо значительными массогабаритными показателями, либо сложной структурой с меньшей надежностью.

Для поиска рациональных технических решений при синтезе новых технологических систем и компоновок резьбонарезного станка целесообразно использовать метод морфологического анализа, который направлен на последовательный перебор всех возможных вариантов и является примером системного подхода к решению творческих задач.

Сущность метода МА состоит в том, что в совершенствуемой ТС выделяют несколько характерных для нее структурных морфологических признаков, по каждому из которых составляют список различных конкретных вариантов (альтернатив) технического выражения. Каждый признак может характеризовать какой-либо конструктивный узел системы, какую-то ее функцию, режим работы системы, форму взаимодействия узлов, т.е. параметры системы, от которых зависит решение проблемы. Признаки с их альтернативами можно располагать в форме таблицы, называемой морфологической матрицей, что позволяет лучше представить поисковое поле. Согласно принципам компоновки, резьбонарезной станок разделяется на взаимосвязанные подсистемы и элементы (таблица 1).

Область применения метода – решение технических задач, относящихся к объекту в целом при наличии полной информации об объекте и заключающихся в усовершенствовании объекта. Наиболее целесообразная область применения метода МА – решение конструкторских задач общего плана (проектирование комплексов, станков, их узлов и механизмов, поиск технологических принципов, схем, способов формообразования и т.д.) [2].

После заполнения морфологической матрицы для системы резьбонарезного станка с МПС выполняется синтез вариантов его структуры. Методика поиска оптимальных решений состоит в выделении наиболее приемлемых модулей и их признаков (вид, свойство) для создания новой системы. Выделенные модули обеспечивают правильное функционирование системы, но имеют различные характеристики (надежность, стоимость, массу и габаритные показатели).

Таблица 1. Морфологическая матрица системы резьбонарезного станка с МПС

Название подсистемы	Вид/свойство
Модуль главного движения (X)	X1–Пневматический
	X2– Гидравлический
	X3–Электрический
	X4–Комбинированный
Модуль блока несущего элемента (Y)	Y1–Поворотный
	Y2–Стационарный
Модуль длины штанг (Z)	Z1–Изменяющаяся длина штанг
	Z2–Постоянная длина
Модуль изменения координат опорных шарниров (V)	V1–Есть
	V2–Отсутствует
Модуль направляющих (R)	R1–Есть
	R2–Отсутствует

На основе структурно-компоновочного синтеза выявлен наиболее рациональный вариант гибридной компоновки вертикального резьбонарезного станка с комбинированными МПС, сочетающими возможность одновременного изменения длины штанг и координат опорных шарниров – «дельта (кватро)-глайд-под» (комбинация дельта (кватро)-глайда и дельта-пода) (рис. 2).

При изменении длин кинематических звеньев – штанг 1 и координат опорных шарниров 2 инструмент – метчик 3, размещенный в шпинделе 4 резьбонарезной головки 5, может занимать различные вертикальные и угловые положения, совмещаясь с осью обрабатываемого отверстия, в зависимости от конфигурации детали.

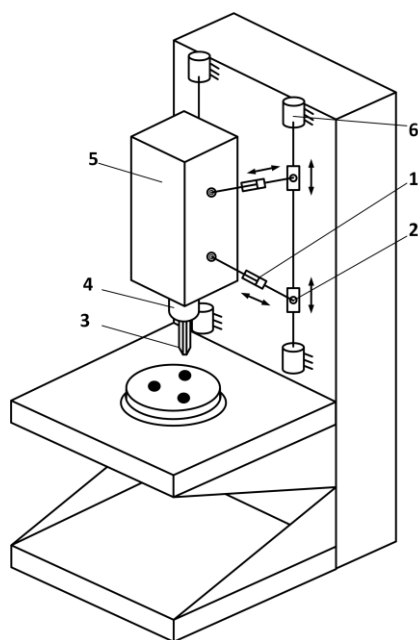


Рис. 2. Гибридная компоновка вертикального резьбонарезного станка с комбинированными МПС

Каждое кинематическое звено механизма, выполненное в виде штанги переменной длины 1, имеет также приводы поступательного действия 6 (гидро-, пневмопривод или шаговый электропривод) для перемещения опорных шарниров 2.

Гибридная компоновка резьбонарезного станка с комбинированными МПС сохраняет функции наиболее ответственных формообразующих движений за резьбонарезной головкой (как в классическом варианте), а функции вспомогательных и установочных перемещений – за МПС. Особенностью операции внутренней резьбообработки является необходимость кроме главного (вращательного) движения метчику сообщать точную принудительную продольную подачу, равную шагу нарезаемой резьбы за каждый его оборот. Эту функцию успешно реализует новая резьбонарезная головка (рис. 3), которая содержит корпус 1, в котором закреплены полюса статора шагового двигателя 2 главного движения [3]. Шпиндель 3 установлен с возможностью вращения и осевого перемещения внутри шагового двигателя 2 и является его ротором. Гайка 4 шариковой винтовой пары является ротором шагового электродвигателя 5 подачи, а винт 6 шарико-

вой винтовой пары установлен на нерабочем конце шпинделя 3 и связан с ним при помощи упругого элемента 7, например, полиуретановой втулки. На рабочем конце шпинделя 3 установлен инструмент 8 – метчик.

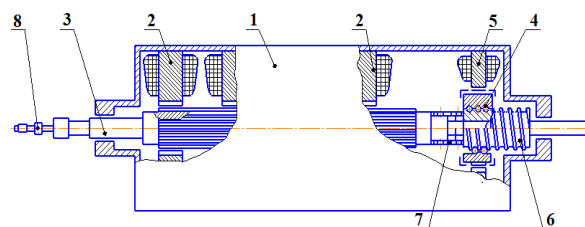


Рис. 3. Общий вид резьбонарезной головки

Блок-схема устройства управления (рис. 4) содержит задающий генератор 9, счетчики 10 и 11 количества импульсов, коммутаторы 12 и 13 для настройки величины подачи и для настройки скорости главного движения соответственно, переключатель 14 реверса, логические схемы 15 и 16, схему 18 реверса, усилители 19-22 тока.

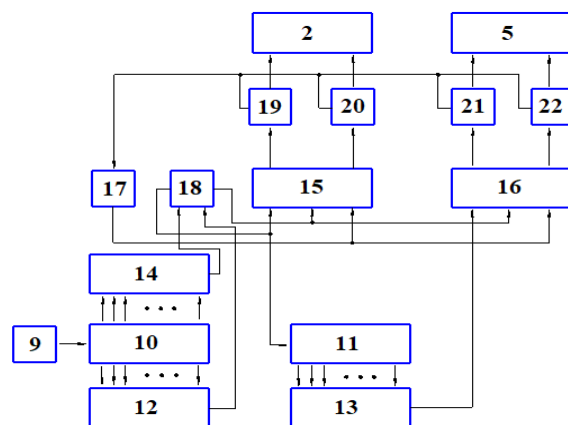


Рис. 4. Блок-схема управления движениями резьбонарезной головки станка

Головка работает следующим образом. Предварительно с помощью коммутаторов 12 и 13 устанавливают величину подачи (шаг нарезаемой резьбы) и скорость главного движения. С помощью схемы 17 разблокируются выходные усилители, на статор шаговых двигателей 2 и 5 подаются импульсы, обеспечивая вращение и согласованное с ним осевое перемещение шпинделя 3. Электродвигатель 5, сообщая вращение гайке 4, обеспечивает винту 6 осевое перемещение,

равное шагу нарезаемой резьбы за один оборот шпинделя 3. Упругий элемент 7 обеспечивает сглаживание рывков, возникающих в процессе работы. По окончании обработки резьбы до заданной длины при помощи включения блока 18 реверса шпиндель 3 с инструментом 8 вывинчивается из обработанного отверстия, а скорость вывинчивания устанавливается с помощью переключателя 14 реверса. Таким образом, скорость вывинчивания в зависимости от условий обработки может быть выбрана в широком диапазоне.

Гибридная компоновка резьбонарезного станка с шестипозиционной револьверной головкой и комбинированными МПС (рис. 5) создана для плоских и корпусных деталей на основе морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза с последующей оптимизацией по критерию надежности и экономической эффективности. Станок содержит резьбонарезную головку 1 – законченный силовой модуль [4], осуществляющий вращательное и поступательное перемещение шпинделя с инструментом. Резьбонарезная головка включает собранные последовательно функциональные блоки – силовой цилиндр, механизм преобразования поступательного движения штока во вращательное, ступенчатый мультипликатор и револьверную шестипозиционную головку 2 [5], в корпусе которой радиально расположены шесть ведомых шпинделей с копирными гайками, шаг резьбы которых соответствует широко применяемым подачам при мелкоразмерной резьбообработке (0,4; 0,45; 0,5; 0,7; 0,8 и 1,0 мм). В осевом пазу шпинделя, находящегося в рабочей позиции, помещен приводной элемент. В шпинделях револьверной головки устанавливаются метчики, шаг резьбы которых соответствует шагу резьбы пар шпиндель-копирная гайка. На револьверной головке выполнен пульт 3, резьбонарезная головка 1 связана через силовой цилиндр магистралью 4 с пневмооборудованием (условно не показано), расположенным в станине 5. В верхней части указанной станины установлены приводы 6 перемещения опорных шарниров 7, связанных посред-

ством штанг переменной длины 8 через шарниры 9 с резьбонарезной головкой 1.

Здесь также использован рациональный вариант резьбонарезного станка с комбинированным МПС с возможностью одновременного изменения длины штанг и координат опорных шарниров – «дельта (кватро)-глайд-под» [6], позволяющий при изменении длин штанг 8 и координат опорных шарниров 7 от приводов 6 занимать различные горизонтальные, вертикальные и угловые положения, совмещаясь с осью обрабатываемого отверстия, в зависимости от конфигурации детали.

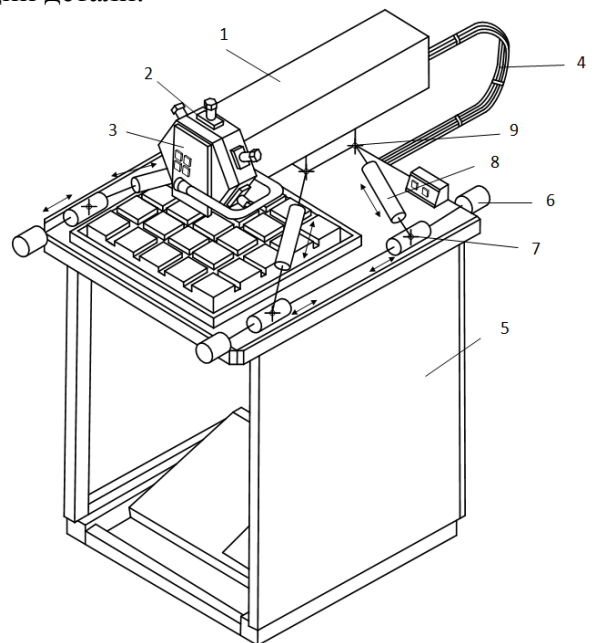


Рис. 5. Гибридный резьбонарезной станок с шестипозиционной револьверной головкой и комбинированными МПС

Гибридные компоновки представленных резьбонарезных станков с комбинированными МПС сохраняют функции выполнения наиболее ответственных формообразующих движений за резьбонарезной головкой (как в классическом варианте), а функции вспомогательных и установочных перемещений – за комбинированными МПС.

Проведенный анализ и синтез нового технологического оборудования с МПС позволяет достичь многовариантности, низкой металлоемкости, модульности компоновок [7, 8]. Использование комбинированных устройств на основе сочетания признаков и преимуществ механизмов типа «глайд» и

«под» открывает перспективы создания новых гибридных компоновок резьбонарезных станков с комбинированными МПС для выполнения задач качественной обработки деталей и существенного расширения технологических возможностей.

Резьбонарезная головка такого станка является малогабаритной конструкцией повышенной надежности за счет сокращения количества кинематических звеньев. Позволяет производить автоматизированную переналадку режимов обработки и может быть использована в станках с МПС в условиях гибких производственных систем.

Список литературы

1. Кузнецов, Ю.Н. Компоновка станков с механизмами параллельной структуры: Монография / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Дмитриев, Г.Е. Диневи́ч. – Херсон: ЧП Вышемирский. – 2010. – 471 с.
2. Кузнецов, Ю.М. Технологічне обладнання с ЧПК: механізми і оснащення: навч. посібник / Ю.М. Кузнецов, О.Ф. Саленко, А.О. Харченко, В.Т. Щетинін. – Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. – 500 с.
3. А.с. 1355370 SU Резьбонарезная головка для гибкого автоматизированного производства / Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко и др. // Бюл. Открытия. Изобретения. – 1987. – №44.
4. А.с. 1038123 SU Резьбонарезная головка / Ф.Н. Канареев, С.П. Машин. // Бюл. Открытия. Изобретения. – 1983. – №32.
5. А.с. 1049209 SU Револьверная головка резьбонарезного станка / Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко и др. // Бюл. Открытия. Изобретения. – 1983. – №39.
6. Часовитина А.С. Комбинированный механизм параллельной структуры (МПС) многооперационного станка / А.С. Часовитина, А.О. Харченко // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (20-23 мая 2019 г.), Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2019. – С. 105-108.
7. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практи-

кум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.

8. Харченко А.О. Патентование и изобретательство: практикум / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.

References

1. Kuznetsov, YU.N. Komponovka stankov s mekhanizmami parallel'noy struktury: Monografiya (The layout of machines with mechanisms of parallel structure) / YU.N. Kuznetsov, D.A. Dmitriyev, G.Ye. Dinevich. – Kherson: CHP Vyshemirskiy. – 2010. – 471 s.
2. Kuznetsov, YU.M. Tekhnolohichne obladnannya s ChPK: mekhanizmy i osnashchennya: navch. Posibnyk (CNC technological equipment: mechanisms and equipment) / YU.M. Kuznetsov, O.F. Salenko, A.O. Kharchenko, V.T. Shchetynin. – Kyiv-Kremenchuk-Sevastopol': Vyd-vo «Tochka», 2014. – 500 s.
3. A.s. 1355370 SU Rez'bonareznaya golovka dlya gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva (Thread-cutting head for flexible automated production) / F.N. Kanareyev, A.O. Kharchenko i dr. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. – 1987. – №44.
4. A.s. 1038123 SU Rez'bonareznaya golovka (Thread-cutting head) / F.N. Kanareyev, S.P. Mashin. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. – 1983. – №32.
5. A.s. 1049209 SU Revol'vernaya golovka rez'bonareznogo stanka (Revolving head of a thread-cutting machine) / F.N. Kanareyev, A.O. Kharchenko i dr. // Byul. Otkrytiya. Izobreteniya. – 1983. – №39.
6. Chasovitina A.S. Kombinirovanny mekhanizm parallel'noy struktury (MPS) mnogooperatsionnogo stanka (Combined mechanism of parallel structure (MPS) of a multioperational machine) / A.S. Chasovitina, A.O. Kharchenko // Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (20 - 23 maya 2019 g.), Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2019. – S. 105-108.
7. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – M.: Tsentrkatolog, 2018. – 144 s.
8. Kharchenko A.O. Patentovedeniye i izobretatel'stvo: praktikum (Patent Science and Invention) / A.O. Kharchenko, A.G. Karlov, A.A. Kharchenko, K.N. Osipov. – M.: Tsentrkatolog, 2018.

[illegible]

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №2(22) 2021

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.