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

«Севастопольский государственный университет»

№ 3(27)

2022

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2022

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

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2022 г. №3 (27)

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

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

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

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Редакционная коллегия

*Абдулгизис 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), 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),
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), Пашиков 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)*

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 20.12.2022 г.

Тираж: 100 экз. Заказ №208.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;

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

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

Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Рыбаков, 7 оф. 107.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Базалеева К.О., Цветкова Е.В. Лазерная 3D-печать аустенитного сплава 316L: изменение ячеистой структуры в процессе термической обработки.....	4
Каледин В.О., Кульков А.А., Лебедев К.Н., Разин А.Ф. Система управления и регистрации тепловых воздействий при теплостатических испытаниях изделий из композиционных материалов.....	10
Братан С.М. Анализ существующих методов управления операциями шлифования.....	18
Часовитина А.С. Проблема моделирования пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании.....	33
Покинтелица Н.И., Братан М.И. Особенности контактного взаимодействия инструмента и заготовки в зоне термофрикционного резания сталей.....	37
Харченко А.О., Владецкая Е.А. Анализ эффективности технологического оборудования на основе обратной задачи массового обслуживания.....	43

УДК 669.245:621.762

ЛАЗЕРНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ АУСТЕНИТНОГО СПЛАВА 316L: ИЗМЕНЕНИЕ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*К.О. Базалеева¹,
Е.В.Цветкова²*

¹Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, Россия,

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Методами металлографического анализа, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгендифракционного и рентгеновского микроспектрального анализов исследованы особенности структуры аустенитного сплава 316L, синтезированного методами селективного лазерного плавления (СЛП) и прямого лазерного выращивания (ПЛВ). Показано, что формирующаяся при лазерной 3d-печати структура обладает иерархичностью – ванны расплава разбиты на отдельные фрагменты, внутри которых расположены ячейки кристаллизации одинаковой ориентировки; границы ячеек представляют собой объемные сплетения дислокаций, закрепленные сегрегациями легирующих элементов; в структуре присутствуют высокие термические напряжения и кристаллографическая текстура. Исследовано изменение ячеистой структуры в процессе отжига, которые проводились в интервале температур от 300 до 1200 °С в течение 1 ч. Установлено, что ячеистая структура обладает высокой термической стабильностью, сохраняясь до температур отжига 800 ÷ 900 °С.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, прямое лазерное выращивание, аустенитная сталь, ячеистая структура.

LASER 3D-PRINTING OF AUSTENITIC ALLOY 316L: CHANGES IN THE CELLULAR STRUCTURE DURING HEAT TREATMENT

*K.O. Bazaleeva¹,
E.V. Tsvetkova²*

¹ Moscow State University of Technology «Stankin», Moscow, Russia,

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

ABSTRACT

The methods of metallographic analysis, scanning and transmission electron microscopy, X-ray diffraction and X-ray microspectral analysis were used to study the structural features of the 316L austenitic alloy synthesized by laser powder bed fusion (LPBF) and direct energy deposition (DED). It is shown that the structure formed during laser 3d printing has a hierarchy - melting baths are divided into separate fragments, inside which there are equally oriented crystallization cells; the cell boundaries are volumetric tangles of dislocations, fixed by segregations of alloying elements; the structure contains high thermal stresses and a crystallographic texture. The change in the cellular structure during annealing, which was carried out in the temperature range of 300 ÷ 1200 °C for 1 h,

was studied. It is shown that the cellular structure has high thermal stability, remaining up to annealing temperatures of 800–900°C.

Keywords: laser powder bed fusion; direct energy deposition, austenitic steel, cellular structure.

Известно, что в процессе СЛП и ПЛВ структура сплава формируется в условиях локальной лазерной перекристаллизации порошкового материала с последующим термоциклированием, связанным с последовательным характером перекристаллизации порошка. Термические условия формирования структуры определяют структурные особенности сплавов, синтезированных методами лазерной 3d-печати. Особенности структуры аустенитного сплава 316L, синтезированного двумя различными технологиями лазерной 3d-печати, а именно, СЛП и ПЛВ, являлись объектом исследования в данной работе.

В настоящее время нет однозначного понимания того, в каком структурном состоянии следует эксплуатировать детали, изготовленные методами лазерной 3d-печати: должны ли они обладать особенной структурой и свойствами, которые определяются методом их получения, либо после пост обработки они должны обладать структурой и свойствами, характерными для данного состава после традиционных видов обработки. Для решения этого вопроса необходимы исследования, направленные на изучение структуры и свойств металлов и сплавов, полученных методами лазерной 3d-печати и подвергнутых дополнительным видам обработки. В данной работе рассмотрено влияние отжига в широком температурном интервале на структуру сплава 316L, полученного методами СЛП и ПЛВ.

Для процессов лазерной 3d-печати был использован порошок стали 316L, состав которого представлен в таблице 1. Порошок имел сферическую форму, был получен методом газовой атомизации, для СЛП процесса была выбрана фракция дисперсностью $20 \div 50$ мкм, для ПЛВ процесса – $60 \div 120$ мкм. В обоих случаях в качестве подложки использовалась пластина стали 316L, защитной атмосферой служил Ar. Для СЛП была использована установка малого формата TruPrint 1000. Процесс проводился при следующих значениях технологических параметров: мощность лазера составляла 113 Вт, скорость сканирования лазера по поверхности – 750 мм/с, расстояние между треками составляло 50 мкм, использовалась шахматная стратегия плавления. ПЛВ проводилось на установке Insstek MX-1000 при мощности лазера 400 Вт, скорости сканирования 850 мм/мин, расстоянии между треками 500 мкм, использовалась перекрестная стратегия плавления, для предотвращения перегрева между слоями выдерживалась пауза 5 с.

Таблица 1. Состав порошкового материала стали 316L, мас.%

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
0.03	18.6	12.9	2.6	0.4	0.4	ост.

Микроструктура аустенитного сплава после лазерной 3d-печати (СЛП и ПЛВ) и дополнительных отжигов исследовалась методами металлографического анализа и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на поверхностях образцов, подвергнутых электролитическому травлению в 10 %-ном спиртовом растворе щавелевой кислоты при напряжении 40 В и плотности тока 0.1 мА/см². РЭМ была выполнена при 20 кэВ в режиме вторичных и обратно отраженных электронов.

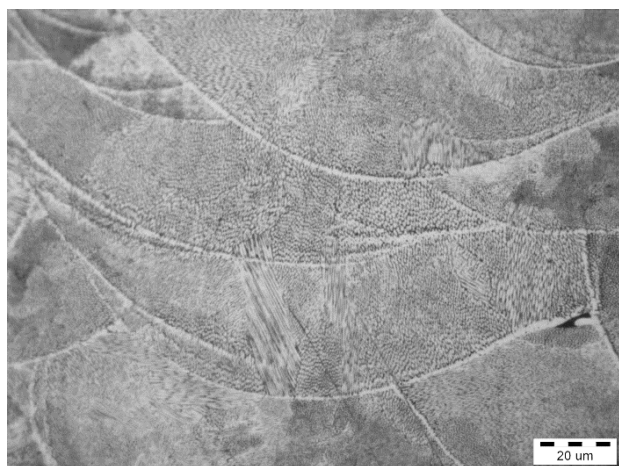
Фольги были приготовлены комбинированным способом: сначала утонение проводилось методом струйной электролитической полировки в 10 %-ном спиртовом растворе HClO_4 , потом ионным методом. Такой способ приготовления фольг был связан с пористостью объектов: поры при электролитическом утонении воспринимались как сквозные отверстия и не позволяли утонить фольгу до необходимых значений. На фольгах в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) анализировалась дислокационная структура сплава и проводился рентгеновский микроспектральный анализ. Локальность данного микроспектрального анализа была сопоставима с толщиной фольги и составляла примерно 50 нм.

Методом рентгеноструктурного анализа оценивался фазовый состав сплава, а также определялся параметр кристаллической решетки аустенитного твердого раствора. Съемка проводилась в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Использовались щели Соллера на рентгеновской трубке и на детекторе, на трубке дополнительно была установлена щель 2 мм. При определении фазового анализа съемка проводилась в интервале углов дифракции $35 \div 141$ градус с шагом $\Delta 2\theta = 0.07$ градуса и экспозицией в точке 2 с. Параметр кристаллической решетки аустенита определялся по линии (331), съемка линии проводилась в интервале углов $136 \div 141$ градус с шагом 0.02 градуса и экспозицией 2 с три раза с переустановкой образца. Кроме того, рентгеновским способом по сдвигу дифракционного пика « $\sin^2\psi$ » определялись остаточные напряжения в образцах после 3d-печати.

На рисунке 1 представлена микроструктура поперечного сечения образцов аустенитного сплава, синтезированных методами СЛП (а, в) и ПЛВ (б, г). Из рисунка видно, что и после СЛП, и после ПЛВ аустенитный сплав имеет ячеистую структуру с характерной иерархией: ванны расплава разбиты на некоторые области – фрагменты, которые, в свою очередь, разбиты на одинаково ориентированные ячейки кристаллизации столбчатой формы [1-2]. Однако размеры ванны расплава для СЛП и ПЛВ процессов существенно различаются: после СЛП средний диаметр ванн расплава порядка 100 мкм, а глубина – 50 мкм; после ПЛВ средний диаметр ванн расплава примерно 500 мкм, глубина – 250 мкм.

Отличается и диаметр ячеек: после СЛП он составляет примерно $300 \div 500$ нм, после ПЛВ – несколько мкм.

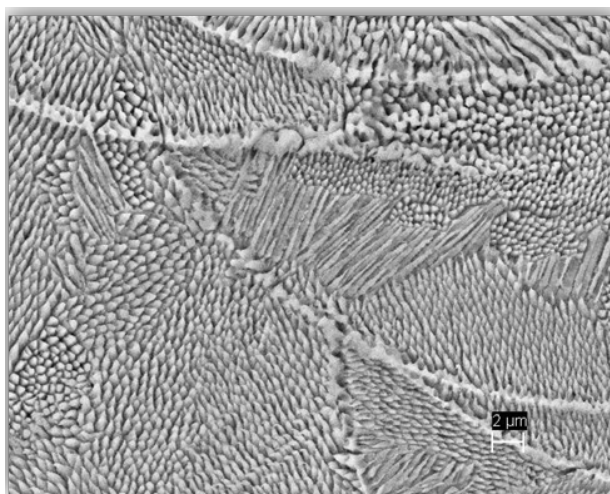
Методом ПЭМ установлено, что границы ячеек кристаллизации представляют собой объемные сплетения дислокаций (рис.2), а методом рентгеновского микроспектрального анализа показано, что границы ячеек обогащены атомами легирующих элементов, а именно, атомами Cr и Mo (табл.2). Подобные результаты представлены в работах [3-6]. Таким образом дислокационная структура сплава, полученного методом СЛП, подобна структуре после сильной пластической деформации. Причиной возникновения такой дислокационной структуры могут быть высокие термические напряжения, формирующиеся при лазерной перекристаллизации. Определенные рентгеновским методом напряжения имеют значения близкие к пределу текучести материала. Структура, в которой сплетения дислокаций закреплены сегрегациями легирующих элементов, предположительно, должна обладать повышенными прочностными характеристиками и термической стабильностью, что и было проверено в данном исследовании.



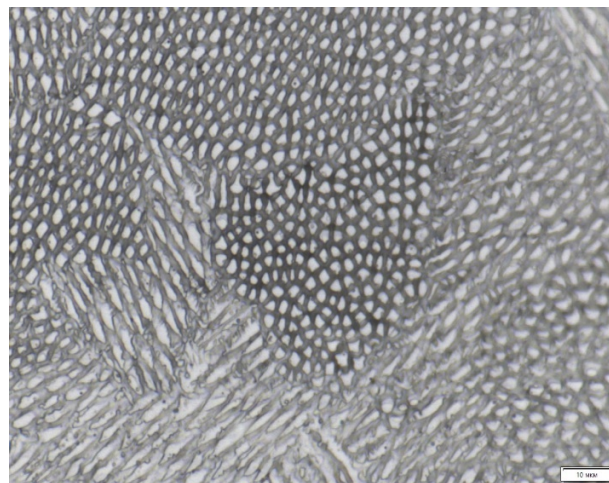
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1. Микроструктура сплава 316L после СЛП (а) и после ПЛВ (б).

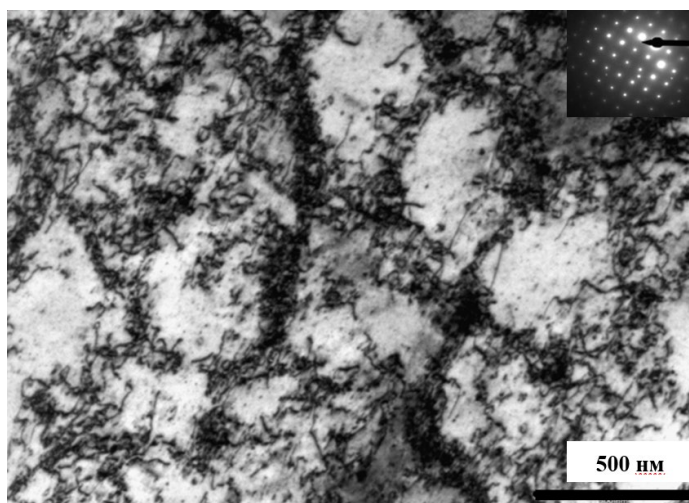


Рисунок 2. Дислокационная структура сплава 316L, полученного методом СЛП.

Таблица 2. Результаты рентгеновского микроспектрального анализа.

Элемент	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	Fe
Центр ячейки, вес. %	11.5	16.8	2.0	1.1	0.6	65.5
Край ячейки, вес. %	11.8	17.6	2.7	1.0	0.8	63.5

На рисунке 3 представлено изменение структуры аустенитного сплава, полученного методами лазерной 3d-печати, в зависимости от температуры отжига. Из рисунка видно, что ячеистая структура, сформированная при СЛП, сохраняется без изменений до 700 °С, далее контраст на ячейках становится слабее, что, по-видимому, связано с исчезновением сегрегаций легирующих элементов на сплетениях дислокаций (800 °С), при 900 °С ячейки в структуре отсутствуют, но сохраняются границы фрагментов. Процесс рекристаллизации после СЛП не наблюдается, но после температуры отжига 1200 °С структура сплава представляет собой полиэдрические зерна с двойниками отжига. В образцах, синтезированных ПЛВ методом, ячеистая структура сохраняется до температуры отжига 800 °С, при 900 °С контраст на ячейках начинает исчезать. При температуре отжига 1000 °С в некоторых областях образца зафиксирована начальная стадия процесса первичной рекристаллизации. Однако, структура, наблюдаемая после отжига при температуре 1200 °С не является полностью рекристаллизованной, здесь только часть зерен имеют равноосную форму и более светлые. Таким образом, несмотря на схожесть структур после СЛП и ПЛВ, термическая стабильность выше у структуры, сформированной при ПЛВ.

Рентгеновским методом установлено, что после лазерной 3d-печати и после всех отжигов сталь имеет однофазное аустенитное состояние. Зависимость периода решетки от температуры отжига имеет разный характер: отжиг при низких температурах (300 ÷ 400 °С) приводит к уменьшению периода γ -твердого раствора примерно на 0.001 Å. Вероятно, оно связано со снятием внутренних напряжений. В образцах, синтезированных методом СЛП, в интервале температур отжига от 400 до 1200 °С наблюдается монотонный рост периода решетки. В образцах после ПЛВ в интервале температур отжига 300 ÷ 900 °С период не изменяется, при больших температурах отжига начинается его рост. При этом суммарный рост периода при отжиге образца, синтезированного СЛП, составляет 0.003 Å, а для образца после ПЛВ – 0.001 Å.

На рисунке 4 приведено изменение значения микротвердости сплава 316L, полученного методом СЛП, от температуры отжига. Из графика зависимости видно, что твердость после СЛП в 1.5 раза выше, чем после стандартной закалки, а также, что повышенное значение твердости сохраняется до высокой температуры отжига – до 700 °С. Для образца, синтезированного ПЛВ, наблюдается подобная зависимость, но исходная твердость составляет HV0.05 230, т.е. ниже, а падение твердости на температурной зависимости твердости начинается при температуре 800 °С.

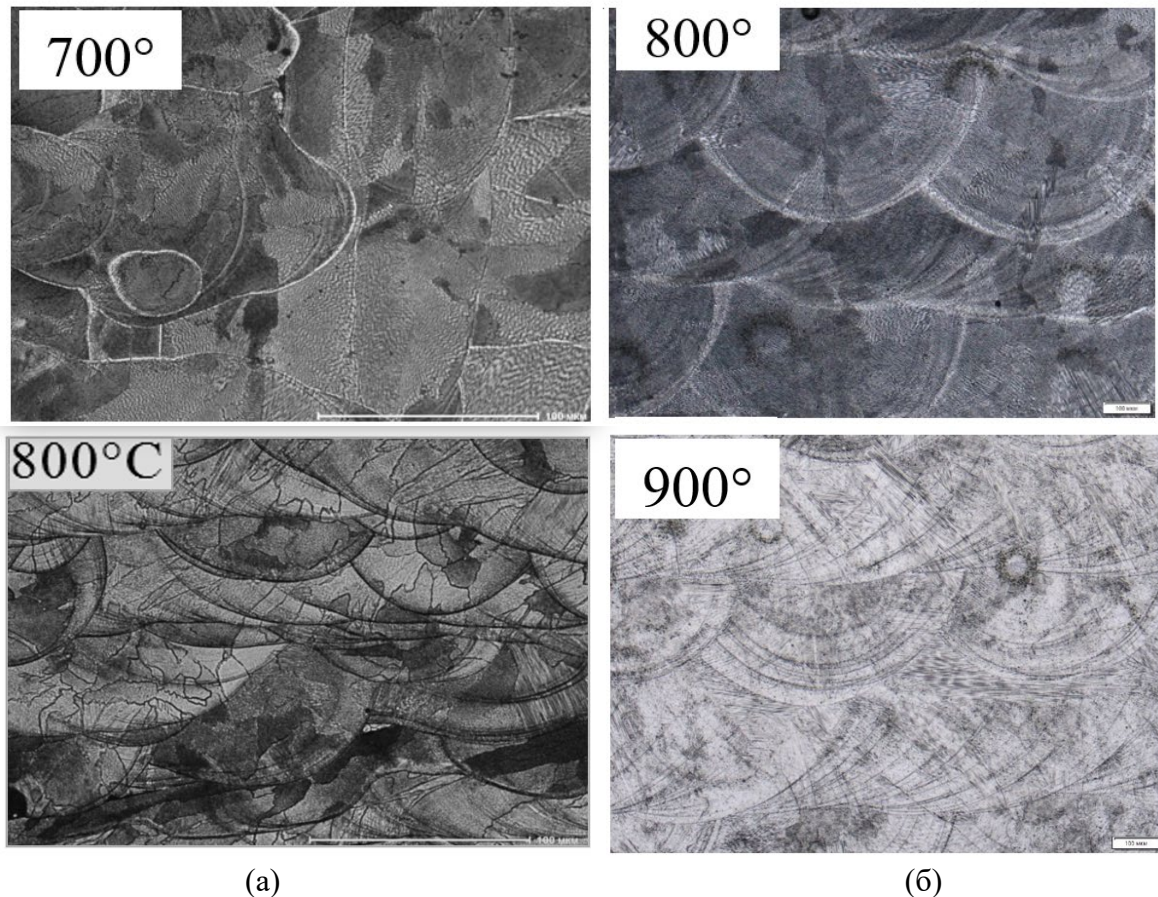


Рисунок 3. Изменение структуры сплава 316L, синтезированного методами СЛП (а) и ПЛВ, (б) при отжигах.

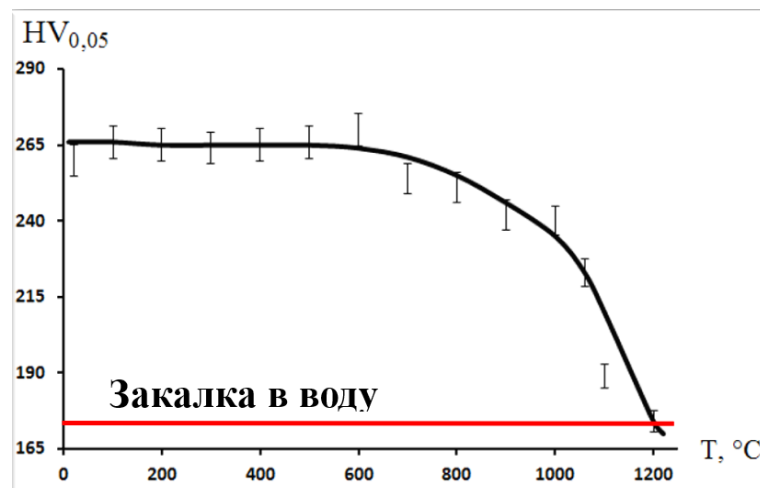


Рисунок 4. Зависимость микротвердости сплава 316L, синтезированного методами СЛП, от температуры отжига.

Таким образом, в процессе лазерной 3d-печати формируется ячеистая структура высокой термической стабильности. Не смотря на схожесть структур, формируемых при СЛП и ПЛВ, структура после СЛП обладает большей твердостью, а после ПЛВ, больше

термической стабильностью. Кроме того, разная зависимость периода решетки от температуры отжига указывает на протекание разных структурных процессов.

Список литературы

1. Yasa E., Kruth J. P. Microstructural investigation of SLM 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*. 2011. 19. 389.
2. Shifeng W., Shuai L., Qingsong W., Yan C., Sheng Z. and Yusheng S. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. 214. 2660. 3.
3. Dahle A. K. and StJohn D. H. Processing from the liquid state *Materials science and Engineering*. 2009. v II. pp 184-217.
4. Bazaleeva K. O., Tsvetkova E. V., Balakirev E. V., Bazaleev E. V. and Kazakov A. V. Mechanical and Electrochemical Behavior of Austenite Alloy Synthesized by Selective Laser Melting Method *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. 11. 31.
5. Zhong Y., Liu L., Wikman S., Cui D. and Shen Z. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *J. Nucl. Mater.* 2016. 470. 170.
6. Salman O., Gammer C., Chaubey A. K., Eckert J., Scudino S. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting *Materials Science & Engineering A*. 2019. 748. 205.
7. Bazaleeva K. O., Tsvetkova E. V., Balakirev E. V., Yadroitsev I. A. and Smurov I. Yu. Thermal stability of the cellular structure of an austenitic alloy after selective laser melting *Russ. Metall.* 2016. 5. 424.

УДК 621.454

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ТЕПЛОСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

***В.О. Каледин¹,
А.А. Кульков¹,
К.Н. Лебедев¹,
А.Ф. Разин¹***

¹Акционерное общество Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения, Московская область, г. Хотьково, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты разработки автоматизированной системы управления тепловыми воздействиями при теплостатических испытаниях изделий из композиционных материалов (КМ).

Ключевые слова: управление тепловыми воздействиями, теплостатические испытания.

CONTROL SYSTEM AND REGISTRATION OF THERMAL EFFECTS DURING THERMOSTATIC TESTS OF COMPOSITE MATERIALS PRODUCTS

*V.O. Kaledin¹,
A.A. Kulkov¹,
K.N. Lebedev¹,
A.F. Razin¹*

¹Joint Stock Company Central Research Institute of Special Mechanical Engineering, Moscow region, Khotkovo, Russia

ABSTRACT

The article gives the results of the development of an automated control system for thermal effects during thermostatic testing of composite materials (CM) products.

Keywords: thermal impact management, thermostatic tests.

Воспроизведение тепловых воздействий, имитирующих аэродинамический нагрев при полете в атмосфере, требует синхронизированного приложения теплосиловых нагрузок в реальном масштабе времени [1]-[5]. Это возможно только при условии полной автоматизации процесса испытаний. В работе [1] представлен анализ различных подходов к разработке математических моделей теплового нагружения путем измерения мощности тиристорных регуляторов типа РНТТ в цепи ламповых нагревателей. В настоящей работе представлены результаты разработки системы управления и регистрации тепловых воздействий, реализованные в испытательном корпусе АО «ЦНИИСМ» в рамках внедрения многоканальной интегрированной автоматизированной системы испытаний конструкций из композиционных материалов.

Система управления (СУ) предназначена для работы в составе комплекса тепловых испытаний. Функциональная схема СУ приведена на рисунке 1. На объект испытаний (ОИ) может быть выделено от одной до шести зон, нагрев которых осуществляется по индивидуальным графикам подъема температуры. Возможно проведение одновременных испытаний нескольких объектов. На ОИ укрепляют термопары (ТП) в количестве, достаточном для получения достоверной информации о температуре ОИ для обеспечения её контроля и регулирования. Количество и места расположения ТП в каждой из зон нагрева определяется методикой испытаний. Формирование управляющих воздействий осуществляется по среднеарифметическому значению температур в зоне. Возможно использование отдельных ТП для информационных целей. Через помехозаграждающие фильтры Ф 1 ... Ф 32 измерительные сигналы ТП поступают на коммутатор К, с помощью которого осуществляется поочередное подключение ТП к входу аналого-цифрового преобразователя микропроцессорного контроллера (МКП). Обработка измерительных сигналов и формирование управляющих воздействий осуществляется в МКП. Персональный компьютер (ПК) обеспечивает взаимодействие оператора с управляющей программой, а также используется для наладочных работ. Связь с ПК осуществляется с помощью интерфейсов CAN и RS-232. Управляющие

воздействия (от 1 до 6) формируются МКП в виде частотных сигналов в диапазоне от 10 до 500 Гц. Далее они блоком выходных преобразователей (БВП) преобразуются в аналоговые напряжения и подаются на тиристорные регуляторы напряжения РНТТ. Каждый РНТТ обеспечивает нагрев одной зоны ОИ.

Входные фильтры, К, МКП и БВП конструктивно выполнены в виде блока электронного (БЭ), который вместе с ПК образует систему управления нагревом (СУН). РНТТ1 ... РНТТn - тиристорные регуляторы напряжения; Н1 ... Нn – нагреватели; ОИ - объект испытаний; ТП1 ... ТПn - термопары; Ф1 ... Фn - фильтры; К - коммутатор; МПК – микропроцессорный контроллер; ПК- персональный компьютер; БВП - блок выходных преобразователей; СУН - система управления нагревом; БЭ – блок электронный.

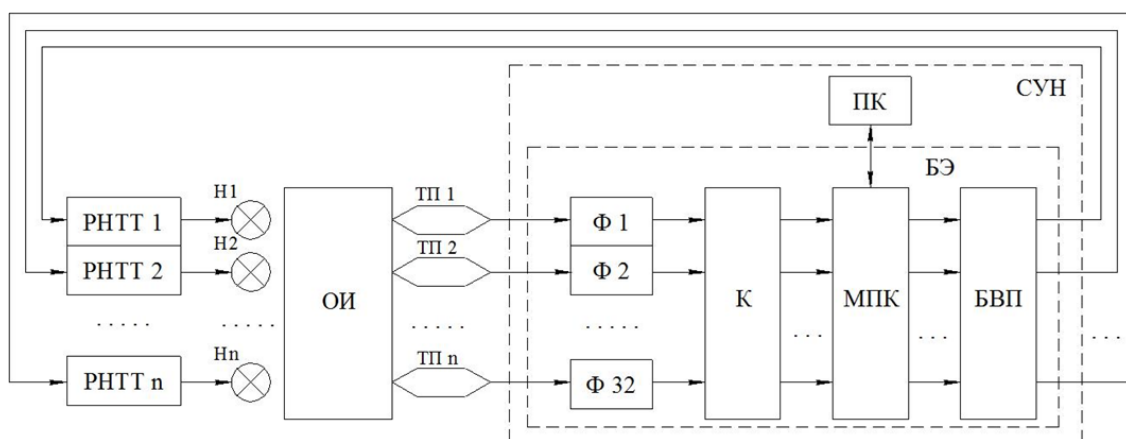


Рисунок 1. Функциональная схема системы тепловых испытаний

Структурная схема одного канала регулирования приведена на рисунке 2.

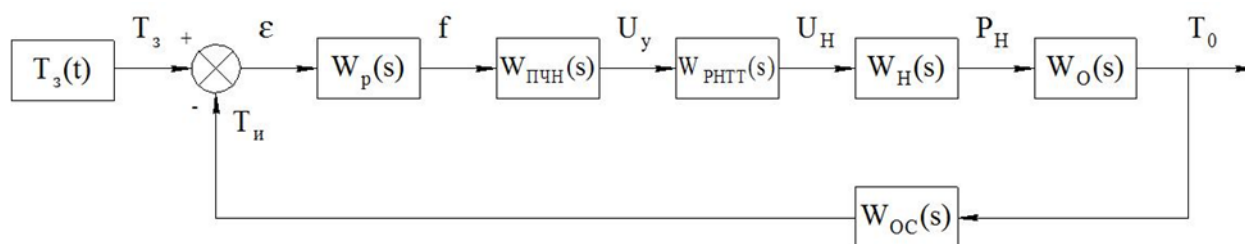


Рисунок 2. Структурная схема канала регулирования системы управления нагревом

Структурные схемы остальных каналов идентичны рассматриваемым.

Программный модуль задания траектории нагрева формирует значения текущей температуры T_3 нагрева изделия в соответствии с программой испытания. Путём вычитания измеренного значения температуры T_{oc} из заданного значения определяется ошибка регулирования E , по которой регулятором осуществляется формирование управляющего воздействия.

На выходе регулятора вырабатывается управляющий (выходной) сигнал f , действие которого направлено на уменьшение отклонения E :

$$f = \sqrt{K_y * E + K_d * \Delta E + K_i * E_{\text{сум}}},$$

где K_y, K_d, K_i - коэффициенты регулятора: усиления, дифференциальный и интегральный соответственно,

E - разница между заданной и фактической температурой,

ΔE - изменение разницы за такт,

$E_{\text{сум}}$ - сумма всех E .

Формирование частоты осуществляется заданием периода работы каналов ШИМ, пропорционального $1/f$.

Операция извлечения квадратного корня обеспечивает компенсацию квадратичной нелинейности нагревателей.

Преобразователь напряжения в частоту представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 100 мс, задаваемой параметрами элементов его схемы. Его выходным сигналом является постоянное напряжение U_y .

Передаточная функция РНТТ представляет собой совокупность нелинейного элемента (выделение положительного значения со смещением точки излома характеристики) с элементом транспортной задержки на время до 10 мс. На рабочем участке передаточной характеристики зависимость напряжения U_n от U_y достаточно близка к линейной.

Нагреватели обеспечивают передачу на объект испытаний тепловой мощности P_n пропорциональной, квадрату напряжения U_n и является апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени около 1 с.

Для диапазона времён, характерных для выполняемых испытаний, объект представляет собой инерционное звено с распределёнными параметрами, которые зависят от его теплофизических свойств (однородность структуры, теплоёмкость, теплопроводность). Корректный учёт этих факторов, а также условий охлаждения поверхности объекта требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований. Для обеспечения работоспособности системы управления нагревом в первом приближении объект испытаний может быть представлена периодическим звеном первого порядка с постоянной времени 5...10 с, определяемый характеристиками достаточно тонкого поверхностного слоя.

Измерения температуры объекта T_0 и формирование значения измеренной температуры T_n осуществляется каналом обратной связи, в состав которого входят измерительные термопары, аналоговые RC-фильтры, а также программно реализуемые цифровые фильтры. В соответствие с этим передаточная функция $W_{oc}(s)$ представляет собой совокупность апериодического звена второго порядка с постоянными времени 200...1000 мс и элементы транспортной задержки на 10 мс.

В состав системы управления входят блок электронный, персональный компьютер с программным обеспечением, комплект кабелей, CAN-интерфейс tinCAN 161. БЭ включает выполнение в виде отдельных конструктивов:

- плата входных фильтров ПВФ;
- блок коммутации термопар БКТ;
- плата соединительная ПС;
- блок контроллера БК;

- плата преобразователей частота-напряжение ППЧН;
- плата выходных преобразователей ПВП;
- блоки питания БП1 ... БП4.

Функциональная схема БЭ приведена на рисунке 3. ПС обеспечивает согласование БТК и БК, ППЧН и ПВН образует БВН.

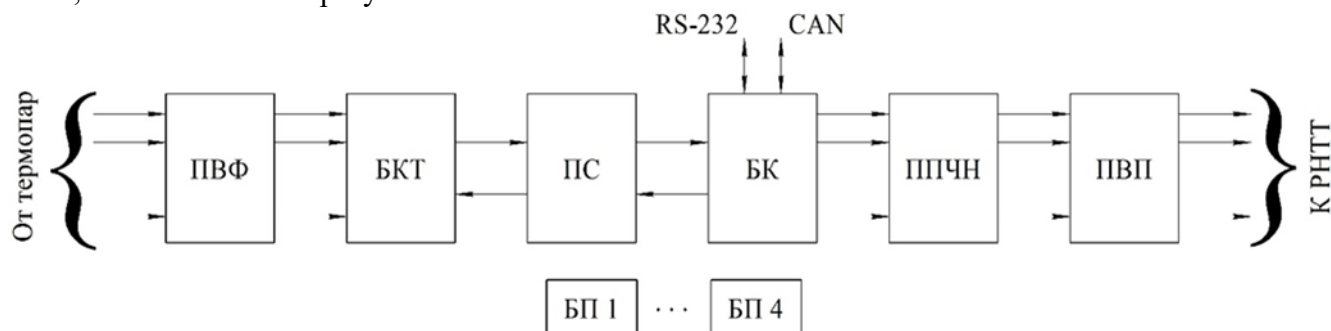


Рисунок 3. Функциональная схема электронного блока

Блок входных фильтров (рисунок 1) содержит 32 индивидуальных RC-фильтра для каждой термопары. Схема такого фильтра приведена на рисунке 4. Резисторы R3 и R4 предназначены для обеспечения нулевого потенциала на дифференциальных входах коммутатора. Резисторы R1 и R2 совместно с конденсаторами C1 и C3 образуют фильтры нижних частот и уменьшает прохождение синфазных высокочастотных помех. Фильтр, образованный резисторами R1, R2 и конденсатором C2, сглаживает высокочастотную дифференциальную помеху, облегчая её подавление контроллером.

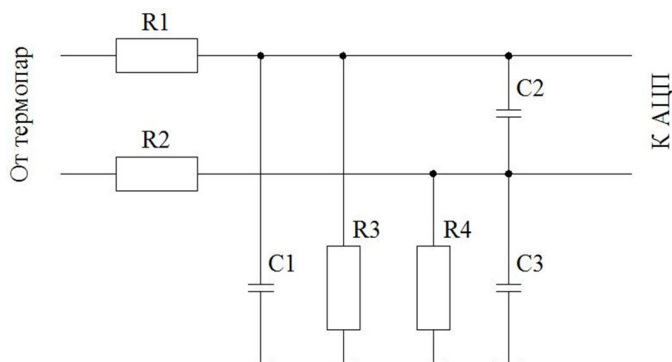


Рисунок 4. Схема фильтра помех на входе измерительного канала

Блок коммутации термопар содержит два коммутатора AIMUX32S, работающих совместно на один АЦП.

Плата соединительная предназначена для согласования распределения цепей по контактам разъёмов блока коммутации термопар и блока контроллера. На плате размещены также ограничительные диоды VD1 ... VD6, предотвращающие повреждение АЦП при выходе измерительного сигнала за пределы 0 ... 5 В, и ограничительный резистор R1 для индикаторного светодиода.

Входные сигналы через буферные усилители на микросхеме DD1 поступают на оптронные элементы гальванической развязки DA1 ... DA3. Преобразователи частоты в напряжение выполнены на специализированных микросхемах DA4 ... DA9 по типовой схеме

включения. Конденсаторы C5 ... CЮ определяют коэффициент преобразования, резисторы R20 ... R25 и конденсаторы C11 ... C16 обеспечивают сглаживание импульсного напряжения в процессе преобразования.

Цепь R12, VD1 создаёт опорное напряжение, с которым сравнивается импульсное напряжение, формируемое оптронами DA1 ... DA3, и обеспечивает надежное формирование сигнала.

Блок содержит шесть усилительных каскадов на операционных усилителях DA1 ... DA3 с эмиттерными повторителями VT1 ... VT6 на выходах. Каждый усилительный каскад может формировать выходной сигнал в виде напряжения (при снятых перемычках) в диапазоне 0 ... 12 В, или в виде тока (при установленных перемычках) в диапазоне 0 ... 10 мА.

Программное обеспечение верхнего уровня функционирует на ноутбуке и выполняет следующие функции:

- интерфейс с оператором;
- поддержка обмена по CANbus сети;
- подготовка программ теплового нагружения;
- ведение базы данных и формирование протокола испытаний.

Программное обеспечение верхнего уровня разработано в среде Microsoft Visual Studio .Net 2003 и использует платформу MFC. В качестве дополнительного компонента используются компонент TChart для отображения графиков. Интерфейс оператора состоит из главной формы и открываемых с её помощью дополнительных форм.

Сетевой обмен осуществляется с помощью CAN интерфейса TIN по протоколу версии CAN2.0B. Каждое сообщение имеет размер 8 байт и передаётся со скоростью 1000 Кбит/с. Программирование обмена построено на библиотеках VCI фирмы IXXAT.

Сценарий передачи данных от микроконтроллера на ПЭВМ изображен на рисунке 5.

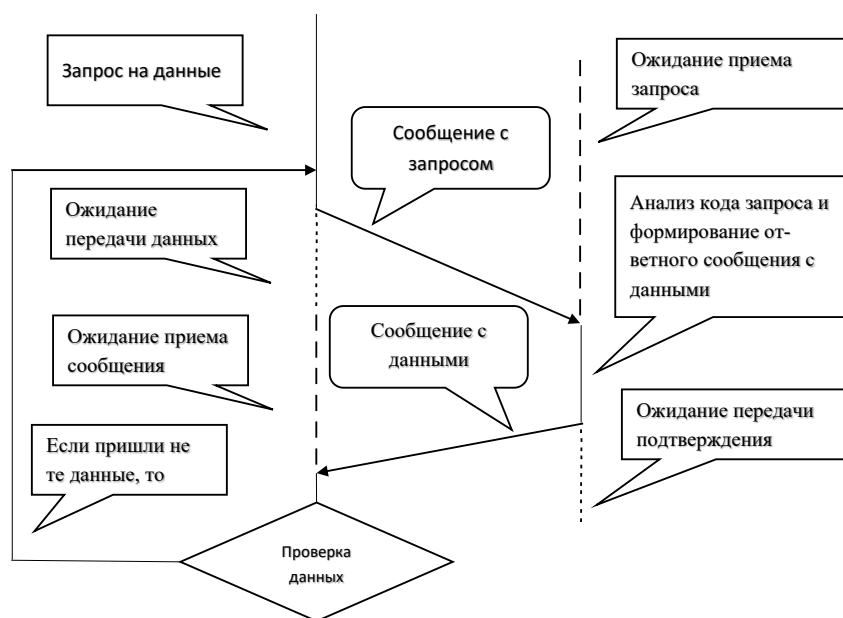


Рисунок 5. Сценарий передачи данных от ПЭВМ на микроконтроллер

ПО нижнего уровня функционирует на микроконтроллере М167-2 и разработано в среде программирования μ Vision3. Сетевой обмен осуществляется с помощью интерфейса Can версии 2.0 В. Каждое сообщение имеет размер 8 байт и передаётся со скоростью 1000 Кбит/с.

Приём сообщений происходит по прерыванию, что увеличивает скорость обработки поступающей информации,

Управление процессом теплового нагружения осуществляется путем приема программы с ПЭВМ, расчёта заданной температуры, чтения текущей температуры с термопар, расчёта средней температуры по зонам, расчёта управляющего воздействия и выдача ЧИМ сигнала.

Все расчёты, связанные с вычислением температуры и выходного сигнала, производятся с тактом 20мс. Контроллер работает с тактом 10 мс, что обусловлено необходимостью считывать сигнал с термопары в разные полуволны напряжения сетевой помехи. При этом считанная помеха имеет одинаковые значения, но противоположной полярности. Последующее суммирование обеспечивает компенсацию помехи. Для устранения сильных единичных помех используется цифровой фильтр. Если измеренное значение температуры t_i отличается от предыдущего t_{i-1} на величину, большую чем значение параметра Δ (заданная «полоса фильтра»), то текущее значение температуры равно $t_i = t_{i-1} + \Delta$, в противном случае t_i равно измеренному значению.

Данные о ходе теплового нагружения отправляются на ПЭВМ для визуализации процесса. К ним относятся заданная и фактическая температура.

ПО нижнего уровня состоит из нескольких модулей. Модуль «Unit1» содержит функцию «main», которая выполняется при старте микроконтроллера. В этом модуле производится вся начальная инициализация (инициализация Сa, ШИМ, таймера и присвоение начальных значений переменным).

Модуль «Actions» содержит всего одну функцию «Answer», которая вызывается прерыванием по приходу Can-сообщения. Он предназначен для чтения и обработки сообщения.

Модуль «Periodic» является основным и предназначен для обработки прерывания таймера. По прерыванию таймера происходит считывание показания с датчиков, затем единицы АЦП переводятся в значения напряжения, считывание температуры холодного спая, расчет температуры по термопарам (переводятся значение напряжения в градусы с помощью полинома и с учётом температуры холодного спая), вычисление средней температуры по зонам, расчёт и выдача управляющего сигнала на модуль ШИМ.

Чтение показания термопар происходит посредством блока коммутации термопар. Для работы с тридцати двумя термопарами используется две коммутационные платы.

Считывание показания датчика с блока коммутации термопар происходит в следующем порядке:

- Задаётся номер подключаемого входа на обеих платах коммутации.
- Осуществляется выдержка времени 170 мс для завершения переходных процессов.
- Считывается выбранный сигнал первой платы коммутатора с помощью нулевого канала АЦП микроконтроллера.
- Считывается выбранный сигнал второй платы коммутатора с помощью первого канала АЦП микроконтроллера.

Данные заносятся в оперативную память и по сигналу таймера через каждые 10 мс операции повторяются. После считывания двух измерений одноимённых датчиков вычисляется их среднее значение, которое и будет итоговым значением температуры. Расчет температуры холодного спая производится не с помощью полинома, а умножением показания датчика температуры холодного спая на сто. Так как значений температуры холодного спая два (у каждой платы своё), то итоговым и будет среднее.

$$U_{ТП} = АЦП * K_B,$$

где АЦП – сигнал АЦП,

K_B – коэффициент перевода единиц АЦП в значение напряжения,

$U_{ТП}$ – напряжение на термопаре.

$$T_{ХС} = AЦП * K_B - 273.16,$$

где $T_{ХС}$ - температура холодного спая.

Вычисление значений измеряемых температур производится по формуле:

$$T = \sum_{i=0}^n (P[i] * U_{ТП}^i) + T_{ХС},$$

где T – температура,

$P[i]$ – коэффициенты полинома,

n – число коэффициентов полинома. Число коэффициентов ограничено 7.

Расчёт управляющего сигнала производится по формуле ПИД- регулятора, как суммы пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющей. Каждая составляющая формулы имеет свои коэффициент, который пользователь может настраивать. Интегральная составляющая ограничена, так чтобы она не могла быть отрицательной. Это сделано для того, чтобы в случае первоначальной отрицательной разности заданной и фактической температур не было накопления (в данной ситуации накопление не нужно так как мы не можем охлаждать объект). Извлечение квадратного корня обусловлено зависимостью тепловой мощности нагревателя от квадрата поданного напряжения. Результатом формулы будет значение частоты выходного сигнала от 10 до 500 Гц.

$$U = \sqrt{K_U * E + K_D * \Delta E + K_I * E_{сум}},$$

где U – частота управляющего сигнала,

K_U , K_D , K_I – коэффициенты регулятора: усиления, дифференциальный и интегральный соответственно,

E – разница между заданной и фактической температурой (ошибка),

$\Delta E = E_i - E_{i-1}$ - изменение ошибки за такт,

$E_{сум}$ – сумма всех ошибок.

Выдача ЧИМ сигнала осуществляется по шести каналам. Первые четыре реализуются с помощью стандартных ШИМ генераторов, а остальные два с помощью таймеров «сравнения и захвата» (CapCom).

Коэффициенты регулятора, присланные с ПЭВМ, прошиваются во Flash память микроконтроллера и считываются из неё при его перезапуске.

Результаты натурных испытаний изделия из КМ и анализ соответствия заданных и реализованных траекторий нагрева приведены на рисунке 6.

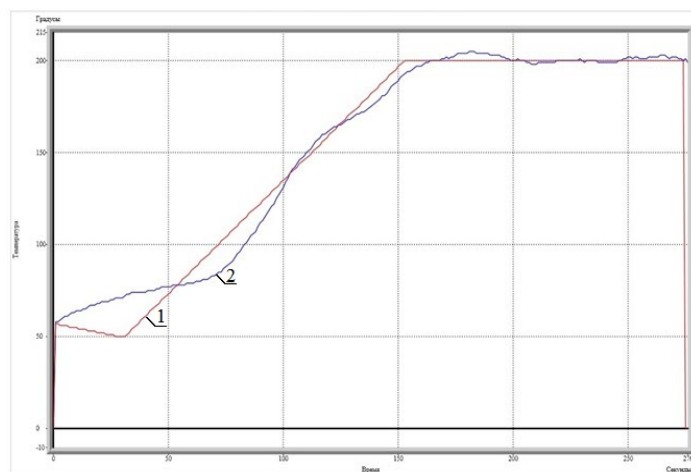


Рисунок 6. Результаты теплопрочностных испытаний: 1 – Заданная траектория теплового нагружения. 2 - Фактические показания датчиков температур

В работе приведены результаты разработки и реализации системы управления нагревом при теплостатических испытаниях элементов конструкций аэрокосмической техники из композиционных материалов и представлены данные испытаний изделий, свидетельствующие о хорошей сходимости заданных и реализованных траекторий нагрева.

Список литературы

1. К.Н. Лебедев. Математическая модель системы автоматизации нагрева при теплостатических испытаниях изделий из композиционных материалов. // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2015. Вып.3 (178). с. 14-20
2. Лебедев К.Н. Разработка математической модели технологического процесса теплостатических испытаний элементов конструкций ракетно-артиллерийских комплексов из композиционных материалов. // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2014. Вып.4 (175). С. 69-76.
3. Королев А.Н., Лебедев К.Н., Тавлович С.С. Автоматизация тепловых испытаний изделий из композиционных материалов. Автоматизация химических производств. М. 1990. С. 40-48.
4. Перминов А.Н., Райкунов Г.Г. О некоторых актуальных направлениях и проблемах развития космической отрасли в современных условиях. // «Полет» 2008, №08.
5. Перцовский М.И. Стратегия развития и модернизации экспериментально-испытательной базы крупных промышленных предприятий // Автоматизация в промышленности, 2009, №6.
6. 5. A.A. Kulkov, K.N. Lebedev. The idea of complex multi-channel integrated automated system unification for testing structural elements of rocket and space technology made of composite materials into their development and manufacturing technological cycle. International Journal of Materials and Applications. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 709 044107

УДК 621.01

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЯМИ ШЛИФОВАНИЯ

С.М. Братан¹

¹*ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

В статье приведен теоретический анализ циклов управления операциями чистового и комбинированного шлифования, что существующие методы управления процессами финишной обработки не позволяют уменьшить разброс параметров качества изделий. Для компенсации воздействия возмущений обычно пытаются использовать замкнутые системы с приборами активного контроля. Однако, вследствие отсутствия адекватных моделей протекающих процессов, возмущений ТС, комплекса средств диагностики, недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю, они не оказались неэффективными.

Обеспечение качества и эффективности операций чистового возможно за счет создания адекватных динамических моделей, учитывающих стохастический характер протекающих процессов, на основе которых должны быть построены автоматические системы управления.

Ключевые слова: циклы управления, параметры качества, чистовое шлифование, производительность обработки, себестоимость, возмущения, замкнутые системы.

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR MANAGING GRINDING OPERATIONS

S.M. Bratan¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article presents a theoretical analysis of the control cycles of finishing and combined grinding operations, that the existing methods of controlling the finishing processes do not allow to reduce the spread of product quality parameters. To compensate for the effects of disturbances, they usually try to use closed systems with active monitoring devices. However, due to the lack of adequate models of ongoing processes, vehicle disturbances, a set of diagnostic tools, the inaccessibility of a number of parameters to direct measurement and control, they did not prove ineffective. Ensuring the quality and efficiency of finishing operations is possible by creating adequate dynamic models that take into account the stochastic nature of the ongoing processes, on the basis of which automatic control systems should be built.

Keywords: control cycles, quality parameters, fine grinding, processing performance, cost, disturbances, closed systems.

Постановка проблемы. Высокий уровень требований к современным машинам и приборам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих изготовление деталей с заданными параметрами качества. Эффективность процессов шлифования напрямую зависит от структуры циклов их управления.

Первое, наиболее детальное, описание принципов построения циклов управления операциями чистового и тонкого шлифования выполнено в работах Г.Б. Лурье [1], П.И. Ящерицына [2].

Дальнейшее развитие методов проектирования циклов нашло отражение в работах Ю.Д. Аврутина, В.Д. Анельчика, Б.М. Базрова, Б.А. Глаговского, А.В. Королева, В.Н. Михелькевича, М.М.Тверского, С.Н. Корчака, В.Г. Лебедева, Ю.К. Новоселова, А.В. Якимова, и других исследователей [3- 15].

Сущность методик построения высокопроизводительных циклов для операций чистового и тонкого шлифования заключается в следующем. За управляющие параметры принимается либо поперечная, либо продольная подачи, либо частота вращения заготовки. Ставится задача построения такого рабочего цикла, при котором минимизируется машинное время обработки или затраты на изготовление детали при требуемом качестве обработки поверхностей. При этом программа управления задается в виде зависимости съема материала (скорости съема) от величины припуска на обработку. В свою очередь величина максимального съема материала ограничивается какими-либо ограничениями, например,

шероховатостью обработанной поверхности, точностью размеров, глубиной дефектного слоя, предельным уровнем вибраций и так далее.

Цель статьи. Анализ существующих подходов управления процессами шлифования для выработки подходов их дальнейшего совершенствования

Изложение основного материала. В большей части работ, связанных с оптимизацией операций шлифования учитывается один из элементов режима [7]. Существуют алгоритмы, учитывающие два и три технологических фактора [8]. Например, для плоского шлифования периферией круга наиболее широкое распространение получили алгоритмы управления вертикальной и продольной подачами [9]. При построении алгоритмов управления в соответствии со спецификой технологических процессов определяют:

1. Количество этапов шлифования и этапов выхаживания в пределах цикла обработки детали.
2. Последовательность осуществления указанных этапов.
3. Вид выхаживания (размерное или временное).
4. Величину припуска, снимаемого на каждом из этапов выхаживания или значение времени на этапе выхаживания.

На рисунке. 1. приведены некоторые наиболее распространенные из традиционных алгоритмов управления $S = f(\Pi)$ без учета ограничений по критериям качества.

Самым простым является алгоритм управления поперечной (радиальной) подачей с постоянной скоростью вращения детали, состоящий из этапов чистового шлифования и выхаживания (рисунок 1а). Широкое распространение получил алгоритм, состоящий из трех этапов: чернового шлифования, чистового шлифования и этапа выхаживания (рисунок 1б). Этап чернового шлифования идет с постоянной скоростью поперечной подачи, а этап чистового шлифования - со скоростью $S_2 < S_1$.

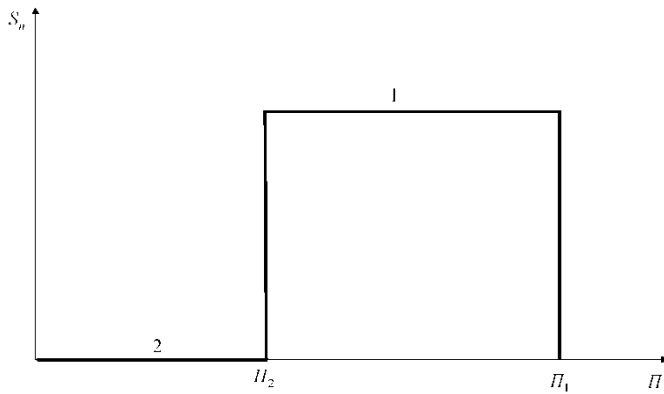
Иногда на этапе чистового шлифования для сокращения времени снижения натяга в упругой системе станка производится отвод шлифовальной бабки от заготовки на величину натяга.

На рисунке 1в приведен цикл, называемый "циклом с двойным выхаживанием". Этот цикл включает в себя этап чернового шлифования с подачей шлифовальной бабки S_1 , этап размерного выхаживания, этап чистового шлифования с подачей шлифовальной бабки S_2 и этап второго размерного выхаживания.

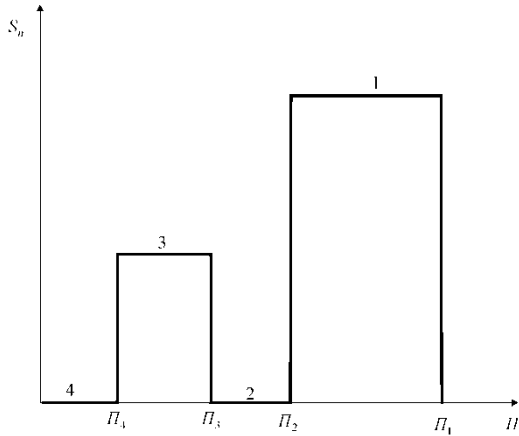
Наиболее прогрессивными из традиционных рабочих циклов являются циклы, в которых на этапах шлифования радиальная подача шлифовального круга плавно снижается по определенному закону. Примером таких циклов может служить цикл, приведенный на рисунке 1г. При реализации рассматриваемого алгоритма за счет плавного снижения съема материала удается исключить этап выхаживания.

Широкое применение традиционных алгоритмов объясняется простотой их осуществления. Однако системы автоматического управления (САУ), реализующие данные алгоритмы, имеют существенные недостатки: в них отсутствуют сведения о состоянии технологической среды, рабочей поверхности инструмента и выходной регулируемой величины и отсутствует возможность ее коррекции, если она отклоняется от заранее предписанных значений.

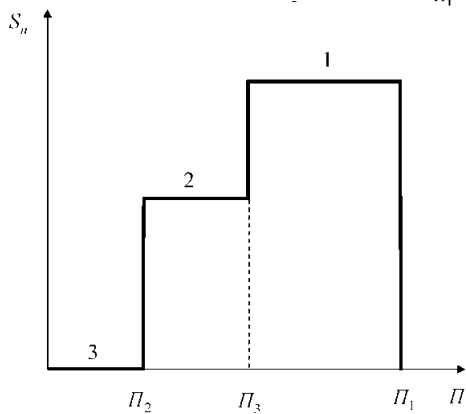
При реализации традиционных алгоритмов, САУ заранее настраивается на наихудшие условия обработки, за счет этого обеспечивается качество шлифования, то есть обработка изделий в этих случаях осуществляется не оптимальным образом, а с уменьшенной интенсивностью съема материала, и заниженной производительностью станков.



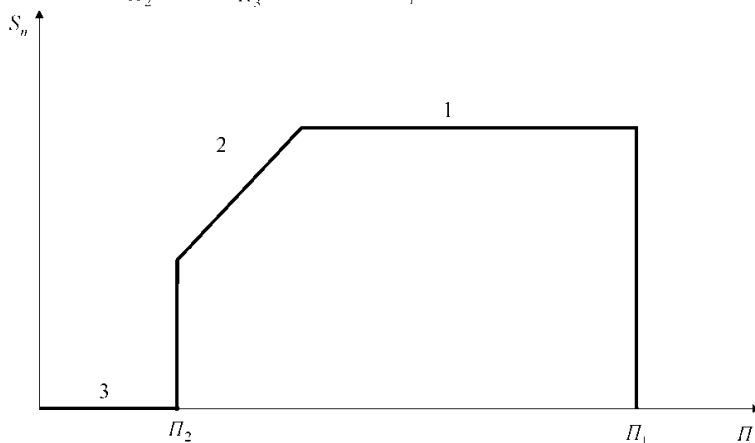
а)
1-черновое шлифование;
2 - чистовое шлифование.



б)
1-черновое шлифование;
3 - чистовое шлифование;
2,4 - выхаживание;



в)
1-черновое шлифование; 2 -
чистовое шлифование; 3 –
выхаживание.



г)
1-черновое шлифование; 2 -
чистовое шлифование; 3 –
выхаживание.

Рисунок 1. Традиционные циклы автоматического шлифования: П - припуск на операцию; S_n - радиальная подача

Известен ряд алгоритмов управления, у которых на отдельных этапах цикла обработки детали производится автоматическое регулирование одной из выходных величин, и в то же время содержатся этапы неуправляемого процесса – выхаживания. К таким алгоритмам, прежде всего, следует отнести алгоритмы управления, разработанные в Московском станкостроительном институте [7]. Этот алгоритм (рисунок 2) «...включает в себя быстрый подвод шлифовального круга в течение времени t_1 врезание шлифовального круга в обрабатываемую деталь при экспоненциально возрастающей во времени радиальной силе до момента времени t_2 , соответствующего заранее заданному значению силы $F_{y\max}$. Устанавливается процесс шлифования в течение времени t_3 при автоматическом поддержании на заданном уровне регулируемой силы $F_{y\max}$ естественное выхаживание в течение времени t_4 ...»

Одна из улучшенных модификаций этого алгоритма предусматривает ускоренное выхаживание на участке t_4 .

Последнее достигается за счет быстрого отвода шлифовального круга от детали, что позволяет скачкообразно уменьшить натяг в системе.

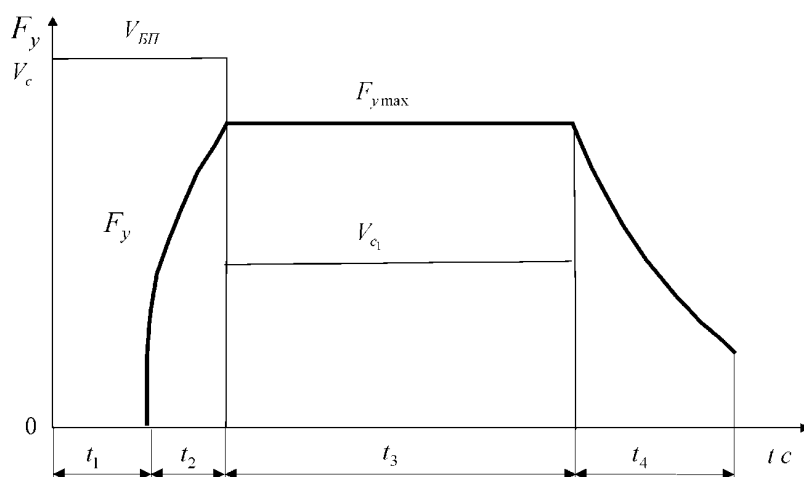


Рисунок 2. Алгоритм управления смешанного типа

Попытки усовершенствования циклов шлифования привели к созданию граничных алгоритмов управления операциями (рисунок 3), которые предусматривают протекание процесса вдоль границ допустимой области технологических переменных и, следовательно, требуют применения САУ для стабилизации такого режима.

При реализации граничного алгоритма управления значительная часть припуска снимается с предельно допустимой скоростью съема материала. Именно за счет этого уменьшается машинное время на обработку. На Калужском моторном заводе, при обработке деталей силовых агрегатов на станках с ЧПУ применяются 5-6-ступенчатые циклы, включающие этапы: подвода шлифовальной бабки на ускоренной подаче, форсированной подачи, черновой подачи, чистовой подачи, доводочной подачи, выхаживания. Используются трехступенчатые циклы, включающие этапы: подвода, чернового и чистового шлифования.

Применение многоступенчатых циклов обеспечивает повышение точности обработки на 1-2 квалитета, снижение шероховатости поверхности в 1,5...2 раза. Недостатком таких циклов является существенное повышение трудоемкости операций.

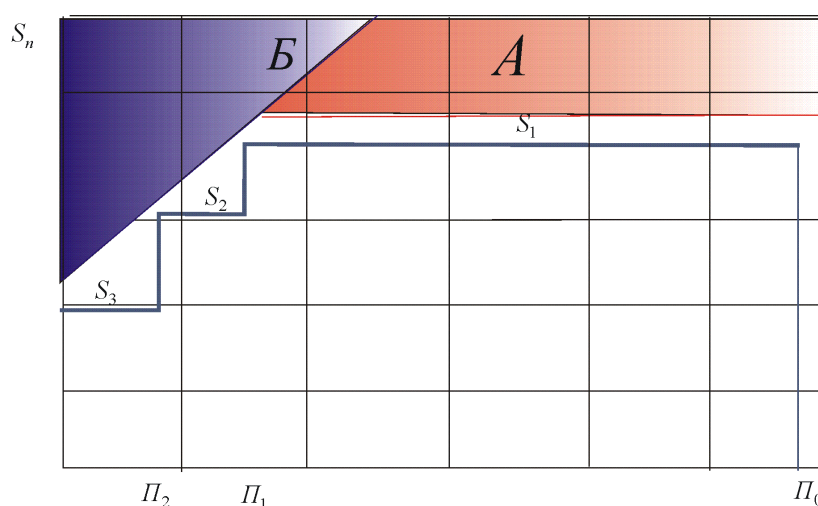


Рисунок 3. Граничный алгоритм управления шлифованием

В последнее время большое внимание уделяется вопросам оптимизации и построения циклов управления при комбинированном шлифовании [10]. При автоматизации операции шлифования токопроводящих материалов, или стабилизации поверхности инструментов, изготовленных на металлической связке, возникает задача управления состоянием обрабатываемой детали и шлифовального круга. Оба объекта являются сложными и динамическими, поэтому шлифование на автоматизированном оборудовании можно рассматривать как две зависимые подзадачи. Анализ существующих исследований в этой области позволяет выявить проблемы, возникающие при решении обеих подзадач. Как правило, в начальный момент времени при правильном подборе характеристик инструмента, режимов резания, оптимальном построении цикла шлифования, обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали. Из всех элементов технологической системы только шлифовальный круг и заготовка претерпевают существенные изменения в относительно короткий промежуток времени. Изменение состояния инструмента оказывает существенное влияние на ход технологического процесса, так как профиль инструмента копируется на поверхности заготовки. Например, увеличение отклонений формы круга эквивалентно динамическому изменению размерных параметров, что приводит к дополнительным возмущениям динамической системы станка, и, следовательно, увеличению шероховатости и волнистости детали, образованию на ее поверхности дефектного слоя, которые в конце периода стойкости инструмента могут возрасти в несколько раз.

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 1, показывает, что шлифовальный круг является наиболее слабым звеном в технологической системе и оказывает наибольшее влияние на стабильность параметров качества деталей.

Его состояние непрерывно изменяется в процессе обработки. На режущих кромках инструмента появляются площадки износа, увеличивается плотность вероятности распределения кромок по глубине, поверхность круга становится волнистой, вследствие чего по данным С.Н.Корчака [3] режущая способность инструмента за период его стойкости уменьшается на 40-50%.

Наличие колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности, объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванных нестабильностью технологической системы. Таким образом, возможности обеспечения высококачественной обработки в современных технологиях шлифования в значительной

степени определяются состоянием рельефа кругов и условиями его контактирования с обрабатываемым материалом.

Таблица 1. Параметры подсистем операции шлифования

Подсистемы	Параметр состояния подсистемы	Выходные переменные, на которые влияет параметр состояния	Процент Влияния	Периодичность восстановления
Станок	Жесткость	Точность обработки, шероховатость поверхности	15...20	10 лет
	Точность перемещений	Точность, шероховатость поверхности	50...80 15...20	3...5 лет "-"
Система управления	Точность управляющих сигналов	Точность обработки	Устраняется с ликвидацией неисправности	
Приспособление	Жесткость	Точность обработки	15...20	12...18 месяцев
	Точность базирования.	Точность обработки	60...100	"-"
	Точность закрепления заготовок	Точность обработки	50...90	"-"
СОТС	Состав	Производительность	30...40	1...2 недели
	Температура	Точность	15...20	"-"
		Производительность	30...40	"-"
	Степень загрязнения	Шероховатость поверхности	50...80	"-"
Инструмент	Форма рабочей поверхности	Точность формы детали,	60...100	20...60 минут
	Форма режущих кромок и их распределение	Шероховатость поверхности	40...60	"-"
		Производительность	60...80	10...40 минут
		Физико - механическое состояние	80...100	"-"
		поверхностного слоя		
		Шероховатость поверхности	50...60	"-"

При дальнейшем совершенствовании процессов алмазно-абразивной обработки возникает необходимость стабилизации профиля инструмента и изучения динамики этих процессов.

Попытка повышения эффективности обработки при шлифовании инструментами на металлических связках привела к разработке методов стабилизации профиля инструмента в процессе шлифования за счет введения в зону резания дополнительной электрической энергии.

При шлифовании изделий, режущую способностью круга обеспечивают несколькими способами:

1. Путем применения устройств правки вне зоны резания;

2. Назначением режимов обработки, при которых происходит постоянное обновление рабочей поверхности инструмента.

Так, например, при профилировании алмазных кругов на металлической связке в работах [12] рекомендована эрозионная правка алмазного круга в автономной зоне. В качестве правящего инструмента предлагается использовать медный электрод и эльборовую пластину для выкрашивания зерен. Правка осуществляется на постоянных режимах, $I_{cp} = 5\text{ А}$, $S_{np} = 0,3\text{ м/мин}$, $U = 49\text{ В}$, частота следования импульсов 22кГц. Стабильность протекания процесса правки достигается за счет постоянной силы прижатия электрода-инструмента.

Для обновления поверхности круга также используют дополнительные абразивные круги или инструмент с абразивно-твердосплавными вставками [14].

Альтернативным способом является способ правки вне зоны резания что, позволяет непосредственно во время обработки и поддерживать режущую способность круга, устраняя засаливание. В ряде работ регулируется плотность межэлектродного тока [15], или напряжение, или сила прижатия правящего инструмента [16] при этом скорость изменения радиус-вектора круга принимается постоянной во времени, как для установившегося процесса. Значение скорости износа определяется экспериментально и является критерием правки. В качестве критерия правки инструмента, согласно [15] принимается глубина профиля круга, она определяет значение сил резания, возникающих при обработке.

На рисунке 4 представлен алгоритм управления плотностью тока при шлифовании и воздействии на инструмент в автономной зоне.

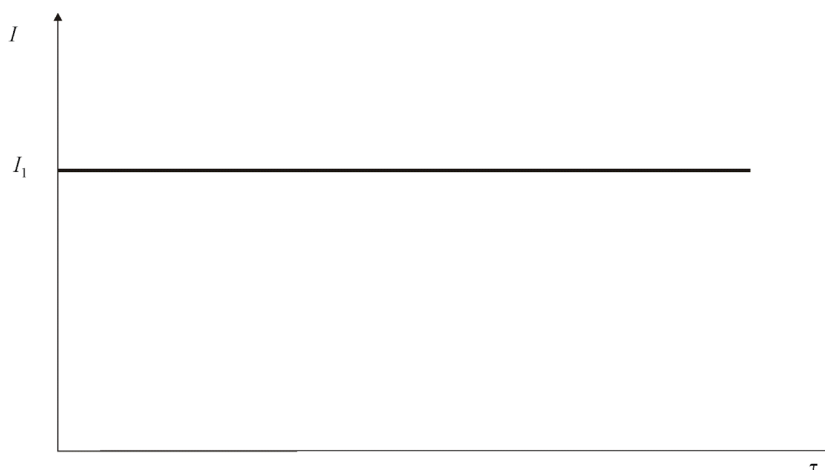


Рисунок 4. Алгоритм управления шлифованием с постоянной плотностью тока между электродами

Значение тока I_1 подобрано экспериментально, что обеспечивает активное обновление режущей поверхности круга при любых режимах некоторого диапазона подач $S_1 - S_2$. Оно неизменно на протяжении всей обработки, поэтому авторы принимают скорость износа инструмента постоянной.

Величина износа пропорциональна времени обработки. Коэффициент пропорциональности определяется экспериментально для используемого типа кругов и материалов. Подобная схема очень надежна и напоминает обработку кругами на мягких связках, когда алмазные зерна выпадают, не используя свой режущий ресурс.

Для уменьшения себестоимости обработки процесс правки круга может осуществляться периодически по мере необходимости. В работе [1] в качестве критерия работоспособности

инструмента использована сила резания (рисунок 5).

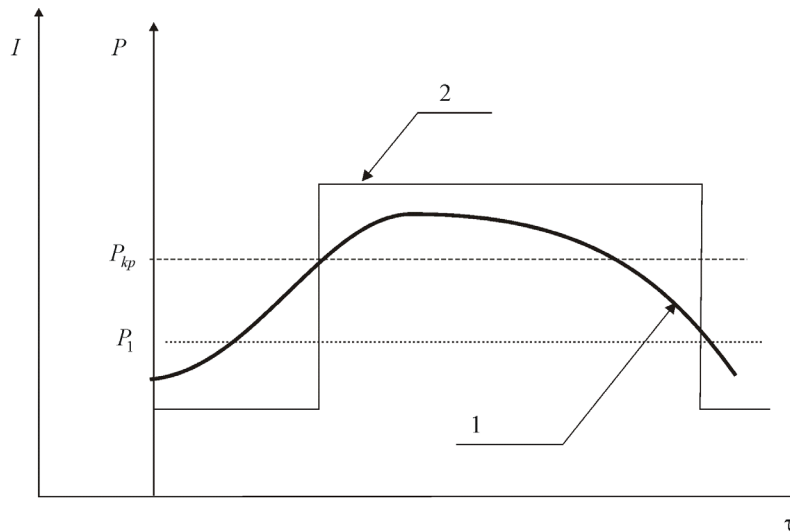


Рисунок 5. Алгоритм сохранения режущей способности по критической силе

При возрастании силы резания при шлифовании до критического значения $P_{кр}$, сила тока на правящем инструменте увеличивается до значения I_2 обеспечивающем активное удаление связки. Обработка с силами выше критической, ведет к образованию прожогов. Значения I_2 , $P_{кр}$ определяются экспериментально для конкретных условий обработки. После снижения сил резания до значения P_1 активная правка прекращается, ток снижается до значения I_1 , которое исключает моментальное засаливание инструмента и служит для увеличения периода нормальной работы.

Применение дополнительных устройств для правки круга вне зоны резания усложняет применение данного метода в промышленности, т.к. выпускаемое в настоящее время серийное оборудование, при использовании этого способа, требует специальной модернизации. Поэтому большой интерес представляют методы, позволяющие поддерживать режущую способность инструмента без дополнительных устройств. Например, цикл со стабилизации режущей способности круга (рисунок 6).

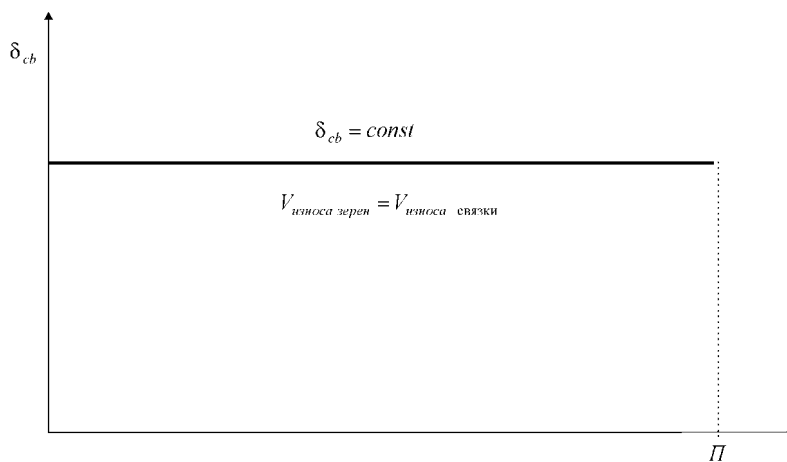


Рисунок 6. Алгоритм стабилизации режущей способности круга

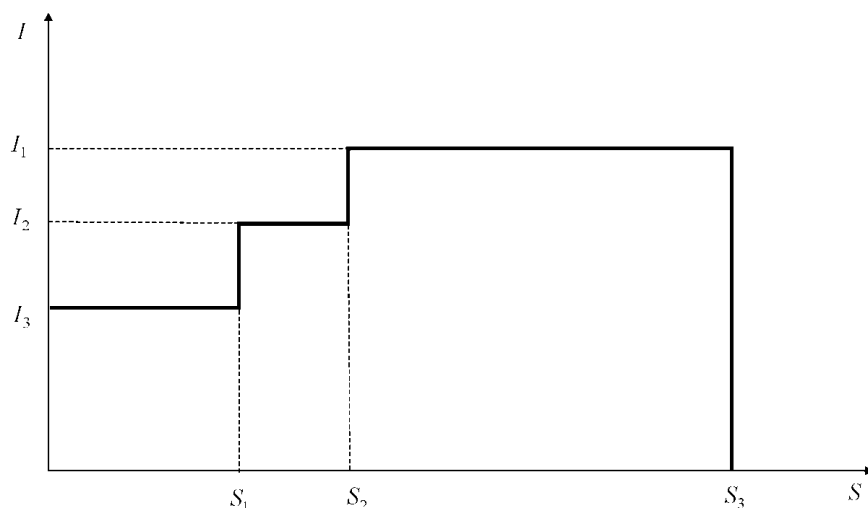


Рисунок 7. Обработка со стабилизацией режущего профиля инструмента

В работах [11, 15] алмазно-эрозионное шлифование твердого сплава инструментом на металлической связке производится без дополнительных устройств для правки. Поддержание режущей способности круга происходит за счет применения режимов обработки, обеспечивающих самозатачивание инструмента. Правящим электродом является сама деталь. Эрозионный разряд оказывает разрушающее воздействие на катод и анод, причем исследованиями [7] установлено, что при возникновении разрядов длительностью менее 10^{-7} с в основном разрушается анод. При работе с длительностью разрядов свыше 10^{-6} с, возможно преобладание разрушения катода. На всех режимах, особенно на чистовых, авторы [12] стремятся исключить действие разрядов на заготовку, поэтому обработка ведется на обратной полярности (заготовка "-", катод "+") с применением в качестве источника питания генератора ШГИ 100/125 в диапазоне 22-66 КГц. Невысокая энергия импульсов ($U < 40$ В) исключает эрозионное воздействие на заготовку. Искровые разряды, возникающие в зоне резания, разрушают связку круга и способствуют выпадению притупившихся зерен. На рисунке 6 представлен алгоритм управления режущей способностью круга за счет режимов шлифования. Опытным путем устанавливают значения тока I_1, I_2 , соответствующих черновому и чистовому режимам.

Таким образом, на протяжении всего цикла обработки авторы стремятся поддерживать глубину профиля круга постоянной, как у запрограммированного инструмента, рисунок 7.

Стабильность состояния инструмента и его самозатачивание обеспечивается при условии, что скорость износа зерен меньше скорости эрозионного разрушения связки.

На сегодняшний день более 70 % шлифовальных станков [7] работает без обратной связи (программное управление на станках с ЧПУ). Преимуществом таких систем является их простота.

Работа таких систем осуществляется на основе детерминированных математических моделей процесса, при расчете цикла используются эмпирические зависимости позволяющие оценить мощность, потребляемую двигателем рассчитать силы резания и температуры, возникающих при обработке. Они в свою очередь, характеризуют плотность теплового потока и состояние поверхностного слоя детали [4].

Для поддержания постоянных силовых характеристик, подачу шлифовального круга постепенно снижают. С течением времени происходит ухудшение режущей способности круга. При достижении некоторого порогового значения режущей способности, производится правка инструмента, (рисунок 8), и цикл повторяется снова.

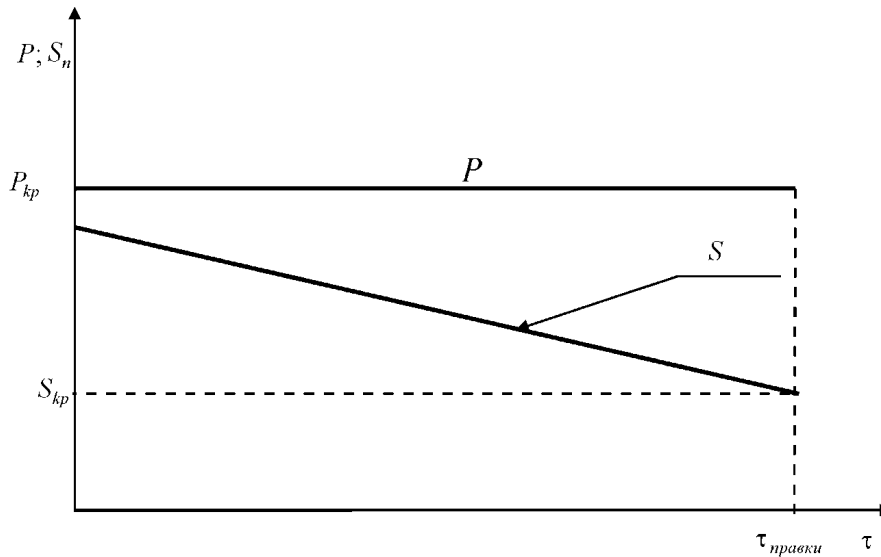


Рисунок 8. Цикл автоматического шлифования с постоянной силой резания

При обработке заготовок с режимами самозатачивания круга, на станках с ЧПУ применяются циклы с коррекцией [10], учитывающие прогнозируемый износ шлифовального круга (рисунок 9), за счет предварительно заданной программы.

При использовании такой методики не учитываются возмущающие факторы, воздействие которых может быть соизмеримо с допустимыми погрешностями обработки.

Дальнейшее совершенствование технологических процессов шлифования осуществлялось за счет внедрения систем с обратной связью. В таких системах, структура цикла и параметры режима могут изменяться в зависимости от фактических условий протекания процесса.

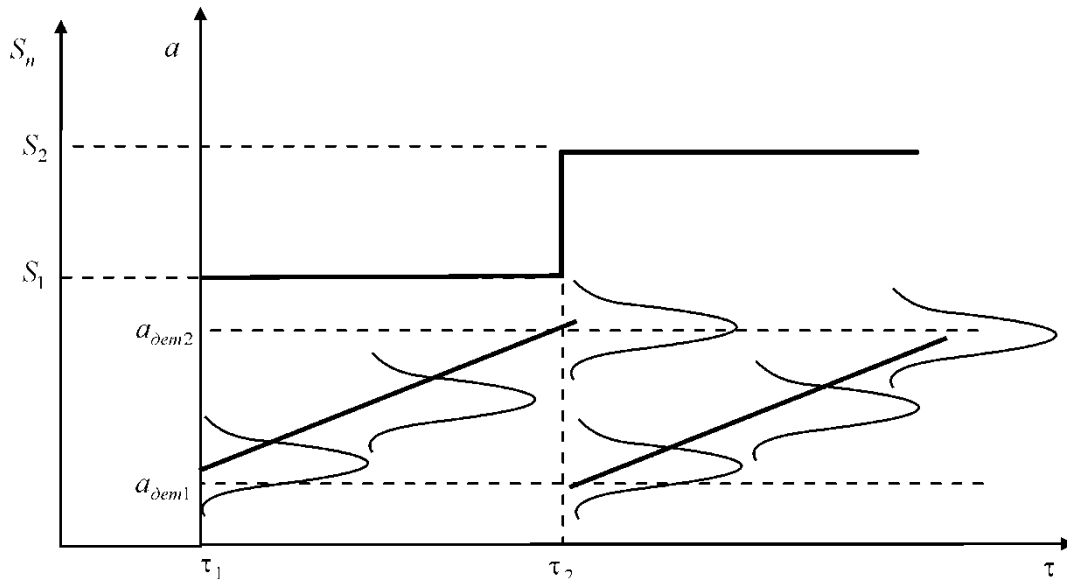


Рисунок 9. Цикл шлифования с коррекцией

Примером осуществления указанного принципа регулирования может служить система автоматического управления (САУ) процессом круглого шлифования (рисунок 10) [11].

$S_1, S_2, \dots, S_i$. Как видно из рисунка, система имеет обратную связь по положению шлифовального суппорта. Перемещение суппорта измеряется индуктивным датчиком (ИД). В результате воздействия на процесс возмущений в виде износа круга $\Delta V_{и.к}$ и упругих деформаций $\Delta S_{у.д}$ происходит существенный разброс показателей качества обрабатываемых деталей...».

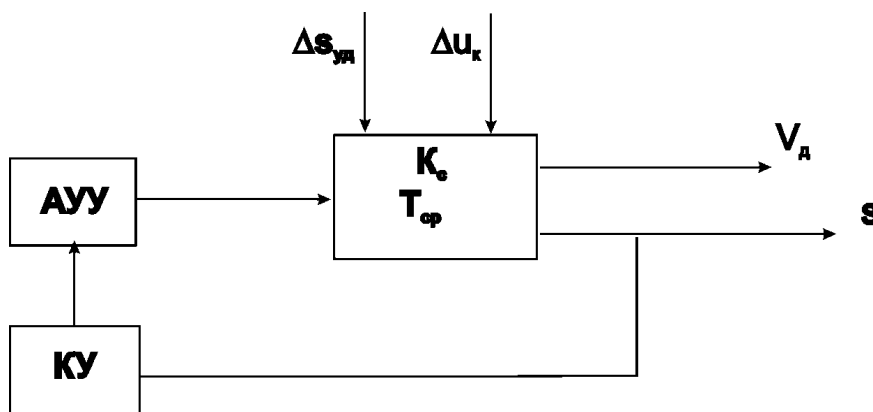


Рисунок 10. Блок-схема САУ

Поскольку уровни возмущающих воздействий находятся в прямой зависимости от регулируемого параметра V_D , то при рассмотренных алгоритмах управления с помощью САУ, приведенной на рисунке 10., не могут быть одновременно получены заданные качественные показатели обработки и высокая производительность формообразования. При использовании рассмотренной САУ, высокое качество шлифования обеспечивается за счет уменьшения интенсивности съема металла, т. е. за счет увеличения машинного времени обработки.

Михелькевич В.Н. [11] предложил способ устранения указанного недостатка за счет перестройки параметров цикла при вариациях постоянной времени процесса шлифования T_C , величина которой определяется механической жесткостью технологической системы j и коэффициентом режущей способности шлифовального круга $K_{РЕЖ}$, причем

$$T_C = \frac{1}{j \times K_{м\dot{r}o}}.$$

Пример такого алгоритма управления приведен на рисунке 11.

Его характеризуют следующие параметры: начальная скорость съема припуска v_{d1} , конечная скорость съема припуска v_{d2} , начальный припуск s_h , припуск на чистовое шлифование s_k . предельные значения параметров алгоритма управления ограничиваются зоной появления прижогов, находящихся слева от линии 1-1, а также зоной предельных упругих деформаций, расположенной выше линии 2-2. Данная реализация не учитывает стохастическую природу процесса, все многообразие технологических ограничений, например, вариации жесткости технологической системы и режущей способности шлифовальных кругов. Автоматическая перестройка параметров цикла может быть осуществлена с помощью САУ, блок-схема которой представлена на рисунке. 12. В отличие от системы, приведенной на рисунке 10., здесь имеется датчик постоянной времени m_c станка ДПВ, который осуществляет ее контроль, контроль текущего припуска s производится, как и ранее, с помощью датчика

припуска (ДП). Сигналы с датчиков поступают на устройство самонастройки и формирования программы УСФП в виде сигнала электрического напряжения, обрабатываемого механизмом радиальной подачи станка.

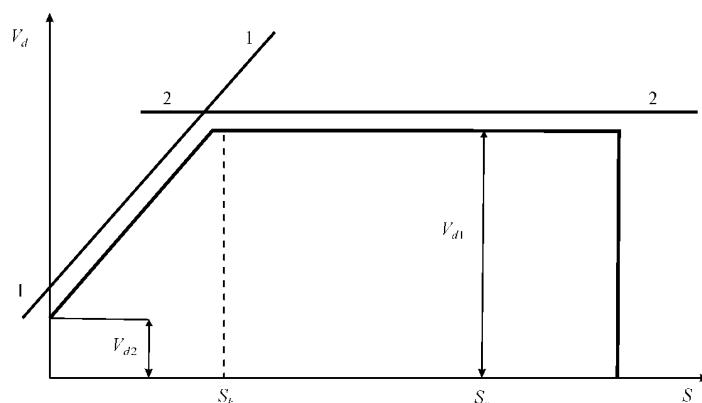


Рисунок 11. Усовершенствованный граничный алгоритм управления поперечной подачей, учитывающий постоянную времени технологической системы

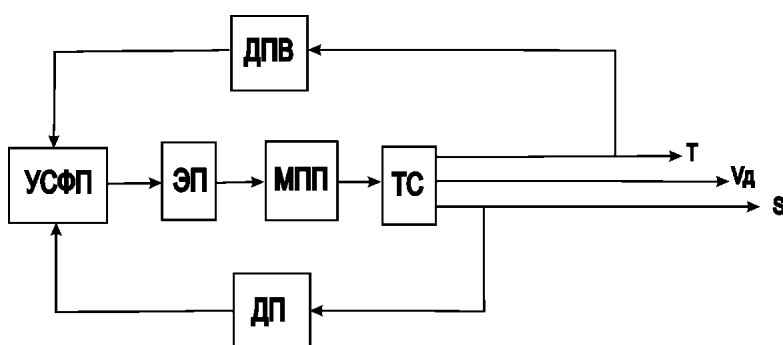


Рисунок 12. Блок-схема САУ, реализующей усовершенствованный алгоритм управления поперечной подачей

В данной системе присутствует дополнительная обратная связь по фактической величине постоянной времени. Недостатком системы является погрешности измерения постоянной времени t_c , которая оказывает косвенное влияние на скорость съема материала v_d , система не учитывает стохастическую природу процесса. Известны системы с обратной связью, осуществляющие рабочий цикл врезания с учетом мощности, затрачиваемой на шлифование [4]. Система для реализации циклов такого типа сравнительно проста, однако стабилизация мощности шлифования при колебаниях режущих свойств шлифовальных кругов сопровождается изменением площади поверхности контакта между кругом и обрабатываемой деталью, что приводит к изменению теплофизических параметров процесса. В экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) разработана САУ врезным шлифованием в процессе обработки деталей типа ступенчатых валов ЭВМ производит два типа расчетов: определение технологических параметров процесса на основе текущей информации и прогнозирование величин этих параметров, что позволяет одновременно осуществить числовое программное управление шлифовальным станком. Такая система относится к классу систем работающих по отклонению. К числу недостатков данного способа следует отнести погрешности, возникающие при экстраполяции сигналов и прогнозировании технологических параметров процессов. Достоинством вышерассмотренных

систем, является их простота и быстрая реакция на возмущения. Прежде чем на выходе инерционного объекта управления появятся существенные нарушения заданного закона изменения управляемой величины, вызванные возмущающим воздействием, на его вход от АУУ подается управляющее воздействие, которое нейтрализует действие возмущения.

Однако для того, чтобы такая система могла реагировать на возмущающие факторы, необходимо использовать большое число измерительных и корректирующих устройств, что существенно усложняет АУУ. Кроме того, не каждое возмущающее воздействие может быть легко измерено.

В работе Яна Бурека [7] предложена замкнутая система стабилизации силы резания. Исходя из значений расчетной F_{cn0} и измеренной F_{cn} сил выполняется модификация модели процесса. На основе этого определяются параметры регулирования. Расчетная схема СПИД складывается из последовательного соединения упругих, массовых и демпфирующих элементов. «...Упругие перемещения системы СПИД стабилизируются в направлении действия нормальной силы F_{cn} . Съем припуска на обработку x_w и радиальный износ x_s предварительно рассматриваются как внешние кинематические возмущения пути подачи шлифовального круга x_f . Расчетная схема системы включает две материальных точки массой m_x для ансамбля подачи круга и m_w - для обрабатываемой детали. Эти две точечные массы перед началом обработки перемещаются в соответствии с законами теоретической механики...».

На основе приведенных рассуждений автором предложена расчетная динамическая модель процесса врезного шлифования по нормальной динамической силе F_{cn} , действующей на обрабатываемую деталь:

$$G_F(S) = \frac{F_{cn}(S)}{x_{sm}(S) - x_c(S)}$$

где G_F - передаточная функция нормальной силы.

Эта динамическая система осуществляет стабилизацию упругой деформации x_c , «...которая имеет влияние на характеристики динамического контура шлифования...».

Упрощенная модель, заложенная в основу разработанной САУ, приводит к неустойчивости выходных параметров качества.

В Харьковском национальном политехническом университете разработана система адаптивного управления процессом врезного шлифования [4], в основе которой лежит система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (h_1 + h_2) \dot{x}_1 + (c_1 + c_2) x_1 - c_2 x_2 - h_2 \dot{x}_2 &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + (h_2 + h_3) \dot{x}_2 + (c_2 + c_3) x_2 - c_3 x_3 - c_2 x_1 - h_2 \dot{x}_1 - h_3 \dot{x}_3 &= P_0 \sin \omega \cdot t, \\ m_3 \ddot{x}_3 + (h_3 + h_4) \dot{x}_3 + (c_3 + c_4) x_3 - c_3 x_2 - h_3 \dot{x}_2 &= 0 \end{aligned}$$

где $P_0 \sin \omega \cdot t$ - внешняя возмущающая сила; c_1, h_1, m_1 - приведенная жесткость, демпфирование и масса детали; c_2, h_2, m_2 - приведенная жесткость, демпфирование и масса круга; c_3, h_3, m_3 - приведенная жесткость, демпфирование и масса шлифовальной бабки.

Рассмотренная модель не учитывает отклонения формы детали и круга от номинальной и производные указанных параметров. В модель искусственно введена внешняя возмущающая сила, параметры которой должны выбираться экспериментально, и не могут быть заданы для широкого диапазона внешних возмущений.

Выводы. В связи с тем, что, ряд параметров является недоступными прямому измерению в производственных условиях можно считать наиболее перспективными комбинированные САУ, которые компенсируют максимально возможное количество возмущающих измеряемых воздействий, и осуществляют оптимальные оценки параметров недоступных непосредственным измерениям или использующие принцип обратной связи отклонений вследствие влияния неизмеряемых параметров. Для построения таких систем необходимы математические модели адекватные процессам, протекающим при чистовом и тонком шлифовании.

Список литературы

1. Лурье Г.Б. Оптимизация цикла шлифования на основе адаптивного управления // *Машиностроитель*, 1979, № 3, с.12–14.
2. Ящерицын П.И. Исследование механизма образования шлифованных поверхностей и их эксплуатационные свойства. – Автореф. ... докт. техн. наук. – Минск, 1962. – 70 с
3. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Оптимизация режимов резания для операции круглого врезного шлифования на станках с автоматическим циклом управления // *Резание и инструмент*, 1985, вып. 34, С. 86–89.
4. Байкалов А. К. Вероятностная оценка размеров среза и усилий резания на абразивных зернах при шлифовании // *Синтетические алмазы. Научн.–произв. сб.*, 1978, № 1, С.15–19.
5. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: 1975. – 189 с.
6. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов // Севастополь: изд-во СевНТУ, 2012. – 304с.
7. Братан С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования. - Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, –Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2006. – 321с.
8. Владецкая Е.А. Обеспечение динамической стабилизации шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // *Вестник современных технологий*. – Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.1. – С.21-41.
9. Bratan, S. Development of Mathematical Model of Material Removal Calculation for Combined Grinding Process / S. Bratan, B. Bogutsky, S. Roshchupkin // *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2018. – pp. 1759-1769
10. Маслов Е.Н., Попов С.А. Абразивная обработка металлов. – В кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967, с. 335–378.
11. Михелькевич В.Н. Щукин Б.Д. Системы автоматического регулирования технологических процессов шлифования. – Куйбышев: кн. изд-во, 1969, 152 с.
12. Новоселов Ю.К., Братан С.М. Моделирование и автоматизация процессов абразивной и комбинированной обработки прецизионных поверхностей //Брошюра. «Научные достижения и опыт отраслей машиностроения народному хозяйству». Севастополь: СФ РДЭНТП общества «Знание» Украины СВВМИУ, СПИ, – 1992, – 16 с.

13. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
14. Худобин Л.В. Смазочно–охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1971. – 212 с.
15. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.: ил.

УДК 621.923:621.90.17

ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

А.С. Часовитина¹

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

АННОТАЦИЯ

В статье выполнен анализ современной теоретической базы, используемой для проектирования процессов шлифования, установлено, что для решения проблемы моделирования пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании необходимо разработать динамические вероятностные модели удаления металла, износа абразивного инструмента, уточнить существующие методики аналитического расчета параметров шероховатости поверхности и точности формы. На основе комплексных динамических моделей и экспериментальных исследований выявить пути повышения качества и эффективности операций шлифования, разработать методики и алгоритмы оптимизации числа операций и режимов резания при обработке прецизионных деталей, методики проектирования оптимальных абразивных инструментов.

Ключевые слова: шлифование, абразивный инструмент, погрешность формы, точность, пространственные отклонения, вероятностные модели, эффективность операций шлифования.

THE ISSUE OF MODELING THE SPATIOTEMPORAL INTERACTION OF THE TOOL AND THE TREATED SURFACE DURING GRINDING

A.S. Chasovitina¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article analyzes the modern theoretical basis used for the design of grinding processes, it is established that in order to solve the problem of modeling the spatial-temporal interaction of the tool and the treated surface during grinding, it is necessary to develop dynamic probabilistic models of

metal removal, wear of the abrasive tool, to clarify the existing methods of analytical calculation of the parameters of surface roughness and shape accuracy. On the basis of complex dynamic models and experimental studies, to identify ways to improve the quality and efficiency of grinding operations, to develop methods and algorithms for optimizing the number of operations and cutting modes when processing precision parts, methods for designing optimal abrasive tools.

Keywords: grinding, abrasive tool, shape error, accuracy, spatial deviations, probabilistic models, efficiency of grinding operations.

Постановка проблемы. Машиностроительное производство базируется на активном целенаправленном использовании процессов преобразования параметров качества при воздействии на сырье и заготовки средств производства и среды. Заданные параметры обеспечиваются за счет изменения размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала. Достигается это применением различных способов формообразования.

Отечественной и мировой наукой в настоящее время накоплен значительный объем теоретической и экспериментальной информации о физических процессах и явлениях, протекающих при формообразовании поверхностей. Сформулированы принципы технологической наследственности, изучено влияние на параметры качества способов обработки, геометрии и материалов режущих инструментов, режимов резания, смазочно-охлаждающих жидкостей и других технологических факторов. Исследованы физико-механические и химические явления процессов резания и износа инструмента, созданы новые эффективные инструментальные материалы, станки и способы обработки [1].

Несмотря на многогранность выполненных исследований, следует отметить, что до сих пор недостаточно изучен механизм формообразования поверхностей. Для ряда методов отсутствуют комплексные динамические модели, отражающие основные закономерности изменения параметров качества, не сформулированы принципы анализа, синтеза и управления технологическими процессами [2].

Целью статьи является определение путей решения проблемы моделирования пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании практических рекомендаций по повышению качества финишной обработки тел вращения.

Изложение основного материала. Необходимость создания динамических, нестационарных моделей актуальна в настоящее время в связи с быстрым развитием электронно-вычислительной техники и управляющих устройств. Модели нужны для математического обеспечения систем автоматизированного проектирования технологических процессов, создания оптимальных конструкций инструментов, проектирования современных станков, решения вопросов технологического обеспечения эксплуатационных свойств машин и приборов [3].

Наибольшее значение проблема моделирования пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании имеет для операций обработки деталей абразивными инструментами и в особенности чистового и тонкого шлифования, которыми завершаются многие технологические процессы. Применение новых способов получения заготовок, уменьшение припусков на механическую обработку, совершенствование конструкций абразивного инструмента, создание станков повышенной и особо высокой точности позволило расширить сферу использования этих прогрессивных методов. Число станков, работающих абразивными инструментами, из года в год увеличивается и составляет в настоящее время на предприятиях подшипниковой

промышленности и предприятиях точного машиностроения 60...80 % от общего парка металлорежущих станков [4].

По чистовому и тонкому шлифованию в настоящее время отсутствуют единые, научно-обоснованные рекомендации, а существующее многообразие технологических процессов на предприятиях не всегда обеспечивает получение заданных параметров шероховатости поверхности, точности и физико-механического состояния поверхностных слоев, что связано с изменением состояния технологических операций, так как существующие методики не учитывают их динамику и стохастическую природу процессов шлифования. Это вынуждает, в ряде случаев необоснованно вводить дополнительные финишные операции и увеличивать трудоемкость изготовления деталей. Поэтому всестороннее изучение закономерностей процессов формообразования поверхностей, разработка динамических моделей и создание на этой основе систем высокоэффективных технологических процессов и оптимальных конструкций абразивного инструмента представляет собой одну из актуальных теоретических и практических задач [5].

Значительный вклад в исследование закономерностей процессов формообразования поверхностей при обработке деталей абразивными и алмазными инструментами внесли ведущие научно-исследовательские организации и высшие учебные заведения. Результаты их работ сделали возможным дальнейшее качественное развитие теории шлифования [6].

В сравнении с обработкой лезвийными инструментами процессы формообразования поверхностей при шлифовании являются более сложными. Поверхность преобразуется от заготовки до готовой детали за более или менее длительный промежуток времени, в течение которого изменяются взаимное расположение исполнительных механизмов станка, элементы режима резания, состояние рабочей поверхности инструмента. В этих условиях прогнозирование качества и эффективности операций возможно только на основе комплексных динамических моделей, которые должны учитывать: отсутствие у абразивных зерен регулярной геометрии; случайность их расположения в инструменте; изменение числа, формы, распределения режущих кромок на рабочей поверхности инструмента за период его стойкости и за время обработки детали; упругие, температурные деформации узлов станка, приспособления, детали и инструмента; наличие вибраций в технологической системе; пластические деформации обрабатываемого материала; изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала под действием теплоты шлифования; многопроходность процесса шлифования и другие факторы. Кроме того, модели должны строиться на основе единого методологического подхода и быть частным случаем более общих моделей процессов формообразования поверхностей.

Проблема разработки комплексных динамических моделей формообразования поверхностей неразрывно связана с вопросами оптимизации технологических процессов. Работами в области теории оптимальных процессов разработан универсальный математический аппарат оптимального управления и только отсутствием динамических моделей следует объяснить несовершенство общей методологии оптимизации процессов шлифования.

Огромный вклад в развитие теории абразивно-алмазной обработки внесли выдающиеся ученые, разработавшие физические основы процесса резания и износа инструмента, установленных Н.И. Богомолым, Г.В. Бокучавой, Л.А. Глейзером, Н.М. Зоревым, С.К. Корчаком, Е.Н. Масловым, А.В. Подзеем, В.Н. Подураевым, С.С. Силиным, И.П. Третьяковым и другими исследователями; кинематических соотношениях процесса резания, предложенных Г.И. Грановским, Е.Н. Масловым; механических основах взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, проанализированных А.В. Королёвым, В.И. Муцянко, С.А. Поповым, С.Г. Редько, А.Н. Резниковым, Г. Кассеном, Ж. Пеклеником;

динамике металлорежущих станков, рассмотренной К.С. Колевым, В.А. Кудиновым; научных принципах проектирования технологических процессов с помощью ЭВМ Г.К. Горанского, Н.М. Капустина, Ю.М. Соломенцева; В.Д. Цветкова; принципах управления точностью, разработанных А.Н. Гавриловым, В.С. Корсаковым, Л.К. Сизеновым и их учениками [7].

Несмотря на имеющийся задел, в настоящее время назрела необходимость в разработке комплексных динамических моделей процесса формообразования поверхностей и оптимизации технологических операций, необходима дальнейшая разработка основных принципов системного анализа и применения математического аппарата теории случайных процессов и теории оптимального управления.

В большей части работ, связанных с оптимизацией операций шлифования учитывается один из элементов режима. В то же время ряд моделей современных станков позволяют непрерывно или периодически изменять несколько элементов, что создает условия для более эффективного управления процессом. Станкостроительная промышленность располагает возможностями для расширения гаммы станков с программным управлением и станков с управляющими электронно-вычислительными машинами. Для их эксплуатации необходимы алгоритмы оптимального управления и методики проектирования технологических операций. Такие алгоритмы и методики могут быть созданы только на основе комплексных динамических моделей.

Без разработки комплексных динамических моделей невозможно также дальнейшее совершенствование теории абразивной обработки. Динамические модели формообразования поверхностей являются частью более общих комплексных моделей процесса шлифования.

Выводы. Из вышеизложенного следует, что разработка комплексных динамических моделей процессов формообразования поверхностей при обработке деталей абразивными инструментами является одной из основных задач на пути совершенствования технологических процессов.

Для ее решения следует рассмотреть основные принципы анализа процессов формообразования поверхностей, вопросы теории формообразования поверхностей инструментами, не имеющими регулярных режущих кромок, основные закономерности изменения параметров качества при чистовом и тонком шлифовании, принципы использования комплексных динамических моделей при проектировании и оптимизации технологических процессов чистового и тонкого шлифования.

Таким образом, необходимо дальнейшее исследование процессов абразивно-алмазной обработки, с целью разработки теории процессов формообразования поверхностей, учитывающей закономерности изменения параметров качества при чистовом и тонком шлифовании при практическом применении разработанных моделей.

При разработке новой теории нужно учесть то, что процесс формообразования поверхностей необходимо рассматривать не только в пространстве, но и во времени. Технологическая операция должна изучаться как динамическая система управления качеством.

Таким образом, назрела необходимость создания единой теории формообразования поверхностей инструментами, режущие кромки которых не имеют регулярной геометрии. Для этого на основе исследования структуры операции следует, провести декомпозицию операции шлифования, рассмотреть прямые и обратные связи между подсистемами, предложить последовательность их анализа включающую описание: рабочей поверхности инструмента; кинематики и динамики перемещений инструмента и детали; совокупности поверхностей, очерчиваемых в пространстве обрабатываемой детали режущими кромками инструмента; процессов пластических, упругих деформаций, физико-химического взаимодействия материалов детали, инструмента и СОТС; законов отображения геометрических и физических полей на обрабатываемой поверхности. Разработать математический аппарат основных этапов

анализа, сформулировать принципы прогнозирования качества и эффективности операций шлифования, что позволит осуществить практическое применение вышеуказанных теоретических предпосылок.

То есть для решения проблемы моделирования пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании необходимо разработать динамические вероятностные модели удаления металла, износа абразивного инструмента, уточнить существующие методики аналитического расчета параметров шероховатости поверхности и точности формы. На основе комплексных динамических моделей и экспериментальных исследований выявить пути повышения качества и эффективности операций шлифования, разработать методики и алгоритмы оптимизации числа операций и режимов резания при обработке прецизионных деталей, методики проектирования оптимальных абразивных инструментов.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов // Севастополь: изд-во СевНТУ, 2012. – 304с.
2. Братан С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования. - Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, –Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2006. – 321с.
- 3.Энциклопедия докторов наук – машиностроителей России:научно- популярная монография/под. ред. С.А. Зайдеса.– Иркутск: Из-дво ИРНИТУ, 2020,– 452 с., ил
4. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S.Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Number 01083.
5. Bratan S. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Num-ber 01079.

УДК 621.923:621.90.17

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ В ЗОНЕ ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ

***Н.И. Покинтелица¹,
М.И. Братан¹***

¹ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты изучения контактного взаимодействия инструмента и заготовки при высоких скоростях скольжения процесса. Полученные результаты указывают на необходимость анализа процессов тепловыделения, распределения теплоты в области контакта,

контактных температур и температурных полей, механических и адгезионных свойств нагретых поверхностных слоев, процессов, связанных с оплавлением поверхностей трения. В статье выдвинута гипотеза о периодическом возникновении и разрушении мостиков сварки при ТФР сталей, что приводит к резкому увеличению коэффициента трения.

Ключевые слова: тепловыделение, распределение теплоты, тепловые поля, поверхности трения, коэффициент трения.

FEATURES OF CONTACT INTERACTION TOOLS AND WORKPIECES IN THE ZONE THERMAL FRICTION CUTTING OF STEELS

*N.I. Pokintelitsa¹,
M.I. Bratan¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article presents the results of studying the contact interaction of the tool and the workpiece at high sliding speeds of the process. The results obtained indicate the need to analyze the processes of heat generation, heat distribution in the contact area, contact temperatures and temperature fields, mechanical and adhesive properties of heated surface layers, processes associated with melting of friction surfaces. The article hypothesizes about the periodic occurrence and destruction of welding bridges during the TFC of steels, which leads to a sharp increase in the coefficient of friction.

Keywords: heat generation, heat distribution, thermal fields, friction surfaces, coefficient of friction.

Постановка проблемы. Эффективным направлением улучшения обрабатываемости сталей является предварительный разогрев срезаемого слоя, в результате чего изменяются его физико-механические характеристики в зоне резания. При нагреве заготовки уменьшается сопротивляемость обрабатываемого материала, что определяет повышение режимов резания, стойкости инструмента и рост производительности труда.

Одним из прогрессивных методов, позволяющим повысить пластичность снимаемого слоя металла за счет локального его нагрева силами трения непосредственно быстровращающимся инструментом, имеющим малую стоимость и обладающим высокой стойкостью при обеспечении приемлемых показателей качества обработанной поверхности, является метод фрикционного формообразования.

Для того, чтобы создать оптимальные условия обработки, необходимо достаточно детально рассмотреть все эффекты, которые возникают при фрикционном формообразовании. Возникает задача сохранения температуры рабочих поверхностей инструмента в допустимых пределах, обеспечивая при этом достаточный подвод дополнительной энергии в контактную зону для повышения пластичности металла с целью облегчения его деформирования и удаления с обрабатываемой поверхности.

Для создания таких условий необходимо провести анализ особенностей контакта инструмента с заготовкой при данном формообразовании.

Цель статьи. Изучение контактного взаимодействия инструмента и заготовки при высоких скоростях скольжения процесса ТФР.

Изложение основного материала. Нагрев трением зоны резания выгодно отличается от применяемых на практике методов простотой реализации и значительной эффективностью.

Для достижения минимальной интенсивности износа инструмента при максимальной производительности обработки необходимо создать локальный расплавленный слой, контактирующий с инструментом, сохраняя при этом рабочую температуру режущих поверхностей инструмента, не подвергая нагреву, по возможности, расположенный ниже слой обрабатываемого материала для сохранения его физико-механических свойств.

Так как прослойка жидкой фазы расположена между поверхностями инструмента и заготовки, то она играет предохранительную роль для рабочих поверхностей инструмента. В результате замены внешнего трения при непосредственном контакте инструмента и заготовки внутренним разделяющего их слоя уменьшается сопротивление трения и скорость изнашивания инструмента. При этом стойкость инструмента будет достаточно высокой в сравнении с традиционной схемой резания металлов.

Метод термофрикционного резания (ТФР) проводится при скорости относительного скольжения инструмента (режущего диска) и заготовки в пределах 40...80 м/с. При этом температура в некоторых точках зоны контакта чрезвычайно высока и достигает температуры плавления обрабатываемого металла [1].

Очевидно, что при проведении метода ТФР наблюдается процесс схватывания 2-го рода со всеми присущими ему особенностями: высокие значения удельных давлений, скорости и контактной температуры, вырывы, налипание и размазывание металла контактирующей пары. Однако в данном случае возникает необходимость определения условий, связанных с существованием устойчивой прослойки между контактирующими поверхностями, локализации пластических деформаций в определенной области, физико-химических превращений и разрушения в минимально возможном поверхностном слое, подлежащем удалению в процессе резания. При этом необходимо достижение динамического равновесия разрушения и получения, по возможности, поверхностных слоев заданного качества [2].

Структурная схема процесса трения при ТФР, отображающая причинно-следственные связи между различными стадиями процесса, имеющего место при фрикционном контакте, приведена на рис. 1. Она состоит из ряда стадий, которые характеризуются подсистемами от 4-го порядка. При основных подсистемах 1 и 2 адсорбированные на поверхности трения молекулы расплавленных частиц обрабатываемого материала и пленок окислов образуют граничный слой и умеренное адгезионное изнашивание происходит по вершинам единичных микронеровностей. Когда режим трения характеризуется подсистемой 3-го порядка, то в этих условиях на поверхностях трения образуются самоорганизующиеся пленки из полимеров трения, включающих в себя образовавшиеся окислы, продукты износа и оплавленные частицы обрабатываемого металла. В этих условиях при значительном термическом влиянии на поверхностях трения в результате трибохимической реакции образуются модифицированные слои, несколько снижающие трение, а процесс износа инструмента приобретает коррозионно-механический характер [3-4].

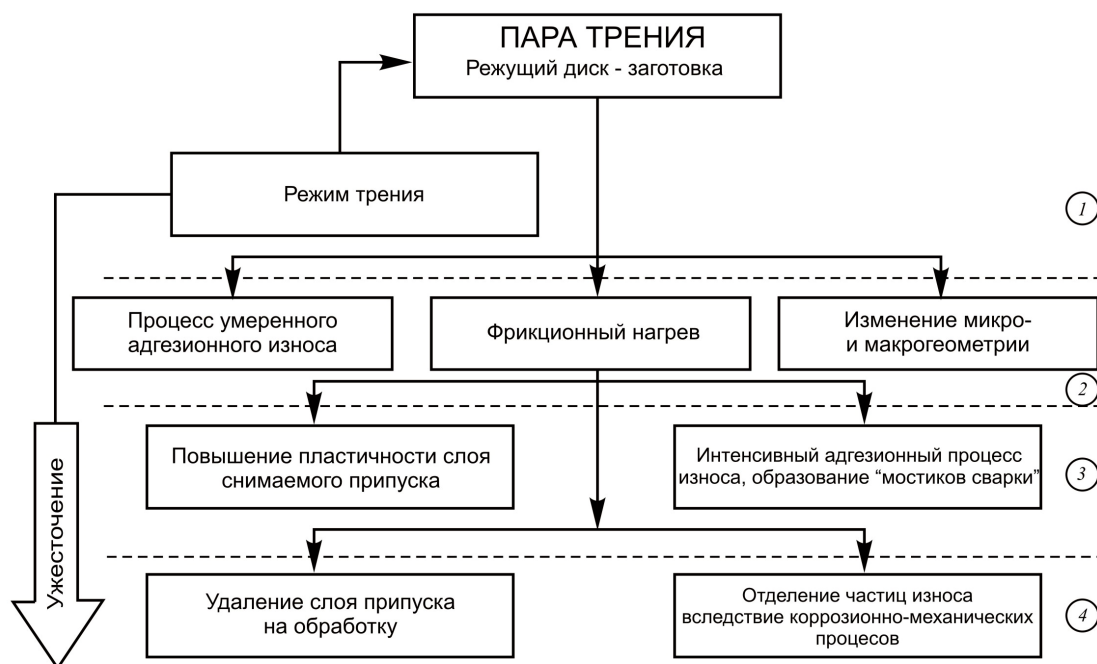


Рисунок 1. Структурная схема взаимодействия определяющих параметров процесса трения при ТФР:

1 – начальное условие работы; 2 – режимы работы при невысоких температурах (процесс врезания); 3 – условия выхода на рабочий режим; 4 – условия трения, приводящие к процессу резания обрабатываемых металлов

Когда скорость удаления модифицированных слоев начнет превалировать над скоростью их образования, наблюдается переход от коррозионно-механического изнашивания к интенсивному адгезионному изнашиванию с последующим удалением металла снимаемого припуска на обработку (подсистема 4-го порядка).

Как следует из рис. 1, для обеспечения снижения величины силы трения в широком интервале нагрузок и температур необходимо, чтобы образовавшийся граничный слой сохранялся на всей фактической поверхности трения.

Процесс трения при ТФР можно отнести к смешанному виду, так как в данном случае наблюдается комплекс явлений, происходящих при одновременном проявлении либо чередовании сухого, граничного и жидкостного трения [5-6]. Данное явление объясняется тем, что контактирующие поверхности режущего диска и заготовки шероховаты, и в зависимости от степени их сближения на разных участках контакта возникают различные виды трения.

Основными факторами, влияющими на процессы в условиях смешанного трения, являются вид и топография шероховатости контактирующих поверхностей.

Участок сухого трения при ТФР расположен в зоне врезания диска в заготовку и имеет протяженность 1...2 мм. В результате контакта микронеровностей (рис. 2, в) в нем можно выделить зоны трения обнаженных при сдвиге чистых ювенильных поверхностей (1) и слоев окислов и адсорбированных веществ (2).

При внедрении передней поверхности режущего диска в заготовку за участком сухого трения образуется зона граничного трения.

Граничное трение определяется склонностью контактирующих материалов к схватыванию на ряде фактических микроконтактах по вершинам отдельных

микронеровностей. В этих местах может возникнуть сухое трение окисных пленок или даже ювенильный контакт.

Граничный слой образуется в результате взаимодействия активных элементов с металлом поверхностей трения. Активным компонентом данного слоя могут быть примеси технологического происхождения, продукты окисления, оплавления и т.д. Разрушению граничного слоя способствует высокая контактная температура. В результате этого обнажаются поверхности трения и возникает непосредственное взаимодействие окисных пленок или даже активных ювенильных поверхностей металлов с образованием так называемых мостиков сварки. При их разрушении отделяются частицы износа. В том случае, если число образовавшихся адгезионных связей превзойдет критическое значение, наблюдается сначала задира, а далее заедание трибосопряжения.

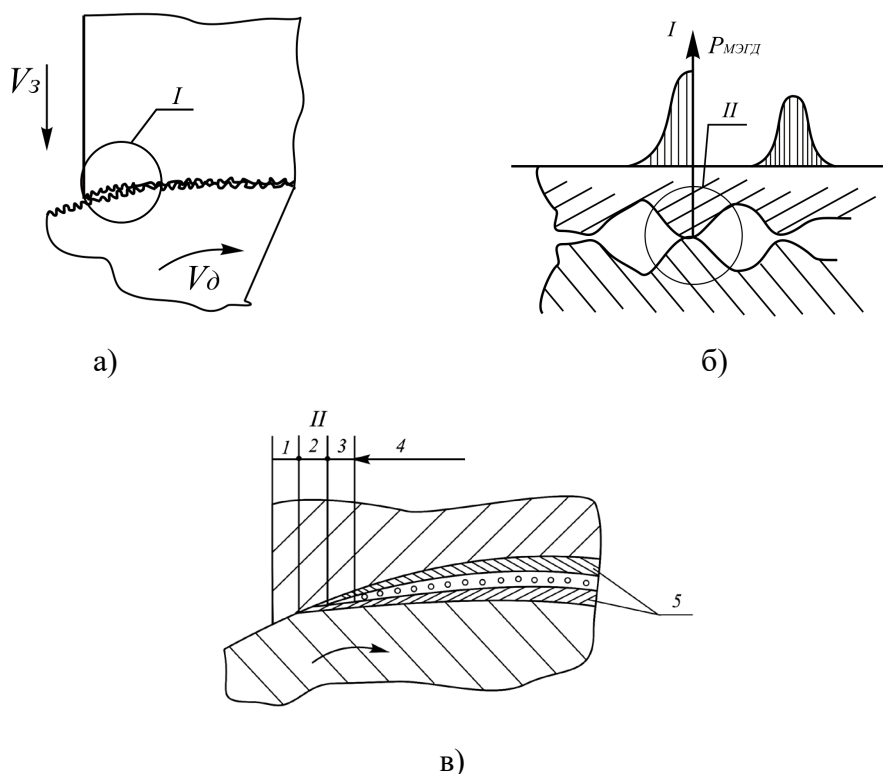


Рисунок 2. Модель трения при ТФР:

- а) макрорельеф контактирующих поверхностей;
- б) гидродинамические микроклинья между неровностями диска и заготовки, и созданное в них давление;
- в) виды трения между шероховатостями поверхностей:
 1 – физически сухое; 2 – технически сухое; 3 – граничное;
 4 – жидкостное; 5 – слой окислов и адсорбированных веществ

При внешнем трении режущего диска и заготовки площадь контакта охватывает небольшой процент номинальной поверхности контакта, а между контактирующими поверхностями возникают щели, в которых при наличии смазочного материала и при взаимном движении поверхностей могут возникать клинья, вызывающие гидродинамическую подъемную силу.

Толщина гидродинамической пленки значительно более чувствительна к изменению условий работы, чем толщина эластогидродинамической пленки. Кроме того, обычно мягкость одной из поверхностей и скольжение делают переход от жидкостного трения к смешанному более быстрым.

Отличительной особенностью процесса высокоскоростного трения при ТФР является интенсивное тепловыделение в области контакта. В условиях высоких скоростей скольжения, являющихся необходимым условием протекания процесса ТФР, температура в зоне контакта может быть близкой к температуре плавления материала заготовки или достигать ее. В некоторых точках фактической площади касания возникают очаги оплавления, которые с ростом скорости переходят в оплавления значительных размеров и охватывают большую часть площади контакта, образуя практически сплошной слой жидкой пленки в виде прослойки между передней и задней поверхностью режущего диска и металлом обрабатываемой заготовки, разделяя тем самым контактирующие поверхности. В этих условиях фрикционное поведение пар трения определяется характером процесса оплавления, свойствами и толщиной расплавленной пленки. В результате замены внешнего трения при непосредственном контакте тел внутренним трением разделяющего их слоя жидкости уменьшаются сопротивление трения и скорость изнашивания поверхности режущего инструмента. Поэтому жидкостное трение – наиболее выгодная форма трения при обработке металлов резанием [6].

Подъемная сила жидкостного трения возникает в сужающемся зазоре между поверхностями контактирующих тел (рис. 2, а) и в зависимости от условий контакта там может появляться гидродинамическое трение (ГД) или эластогидродинамическое трение (ЭГД). Эта сила может быть вызвана также пленками окислов и расплавленных частей обрабатываемого металла (рис. 2, б) в микроклиньях, образованных микронеровностями перемещающихся поверхностей (так называемая микроэластогидродинамическая пленка – МЭГД).

Протекающие при смешанном трении процессы необычайно сложны, так как все виды трения косвенно влияют друг на друга, участвуя в создании подъемной силы, а некоторые из них оказывают прямое взаимное влияние, как например, ЭГД- и МГД-пленки.

По указанным причинам теоретически оценить свойства контакта в условиях смешанного трения очень сложно, так как это требует хорошего знания основных процессов трения, характеристик шероховатости поверхностей и их изменений во время работы. Трудности усугубляются недостаточностью знаний, особенно о явлениях, происходящих в микроразделах контакта, т.е. в микроэластогидродинамической пленке и граничном трении.

В связи с этим в инженерных расчетах пользуются в основном результатами экспериментальных исследований конкретных узлов трения, а теоретические рассуждения, основанные на синтезе различных видов трения, используются для предварительной оценки либо оценки влияния изменения условий контакта для известного вида трения.

Выводы. Изучение контактного взаимодействия инструмента и заготовки при высоких скоростях скольжения процесса ТФР указывает на необходимость анализа процессов тепловыделения, распределения теплоты в области контакта, контактных температур и температурных полей, механических и адгезионных свойств нагретых поверхностных слоев, процессов, связанных с оплавлением поверхностей трения.

Выдвинута гипотеза о периодическом возникновении и разрушении мостиков сварки при ТФР сталей, что приводит к резкому увеличению коэффициента трения.

Список литературы

1. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения.—М.: Машиностроение, 1980.—136 с.

2. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента.—М.: Машиностроение, 1992.—240 с.
3. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механико-химические процессы при граничном трении.—М.: Наука, 1972.—170 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника.—М.: Машиностроение, 1989.—328 с.
5. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении.—М.: Наука, 1967.—263 с.
6. Мамхегов М.А. Определение максимальной температуры скользящего контакта // Машиноведение.—1977.—№1.—С. 107-112.

УДК 629.331:519.81

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

*А.О. Харченко¹,
Е.А. Владецкий¹*

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

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты анализа эффективности работы механообрабатывающего предприятия с учетом обслуживания и правил эксплуатации технологических систем на примере гибкого производственного модуля. Рассмотрен статистический подход к анализу эффекта воздействия независимых случайных факторов, связанных с технологией производства агрегатов (узлов), с мероприятиями по обслуживанию, с условиями эксплуатации и рядом других факторов, влияющих на работоспособность технологической системы. Для поддержания технологической системы модуля в исправном состоянии предпринимаются меры по восстановлению отказавших узлов. Считая случайным событием появление отказа агрегата и его восстановление, можно для построения модели анализа состояния технической готовности системы воспользоваться теорией марковских процессов. Теория систем массового обслуживания позволяет получить оценку любого из состояний, в которых может находиться система, если известны значения интенсивностей всех информационных потоков. Однако затруднения происходят в случае необходимости ввода коррекции при изменениях параметров системы вследствие применения новых технологий обработки, более совершенных технических средств и других мероприятий, связанных с изменением интенсивностей потоков. Изменение интенсивности любого из потоков приводит к изменению вероятностей состояний всей системы, что осложняет реализацию коррекции. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу коррекции интенсивностей потоков, обеспечивающих заданные свойства системы массового обслуживания, показана возможность решения обратной задачи для линейной системы уравнений прямым методом.

Ключевые слова: технологическая система, гибкий производственный модуль (ГПМ), вероятность, граф состояний, система массового обслуживания, коррекция, обратная задача.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT BASED ON THE INVERSE PROBLEM OF MASS SERVICE

*A.O. Kharchenko¹,
E.A. Vladetskaya¹*

¹ *Sevastopol state university, Sevastopol, Russia*

ABSTRACT

The article presents the results of the analysis of the efficiency of the work of a machining enterprise, taking into account the maintenance and operating rules of technological systems, using the example of a flexible manufacturing module. A statistical approach to the analysis of the effect of the impact of independent random factors associated with the production technology of units (assemblies), maintenance activities, operating conditions and a number of other factors affecting the performance of the technological system is considered. To maintain the technological system of the module in good condition, measures are taken to restore failed nodes. Considering the occurrence of a failure of the unit and its recovery as a random event, it is possible to use the theory of Markov processes to build a model for analyzing the state of technical readiness of the system. The theory of mass service systems makes it possible to obtain an estimate of any of the states in which the system can be, if the values of the intensities of all information flows are known. However, difficulties occur if it is necessary to introduce a correction when the system parameters change due to the use of new processing technologies, more advanced technical means and other measures related to changes in flow rates. A change in the intensity of any of the flows leads to a change in the probabilities of the states of the entire system, which complicates the implementation of the correction. The measures taken make it possible to solve the problem of correcting the intensities of flows that provide the specified properties of the mass service system, the possibility of solving the inverse problem for a linear system of equations by the direct method is shown.

Keywords: technological system, flexible manufacturing module (FMM), probability, state graph, mass service system, correction, inverse problem.

Основным показателем эффективности работы механообрабатывающего предприятия (цеха, участка) является коэффициент технической готовности технологического оборудования, его технологической системы (ТС), определяемый отношением исправных ТС к их общему количеству. Процессы обслуживания и правила эксплуатации технологических систем определяют их техническое состояние, в том числе и состояние готовности. Процессы выхода из строя того или иного агрегата (подсистемы) технологического оборудования зависят от воздействия независимых случайных факторов, связанных с технологией производства агрегатов (узлов), с мероприятиями по обслуживанию, с условиями эксплуатации и рядом других факторов, влияющих на работоспособность технологической системы.

В этой ситуации приемлемым можно считать статистический подход к анализу эффекта воздействия указанных причин на состояние ТС. Для поддержания технологической системы модуля в исправном состоянии предпринимаются меры по восстановлению отказавших узлов. Считая случайным событием появление отказа агрегата и его восстановление, можно для построения модели для анализа состояния технической готовности системы воспользоваться теорией марковских процессов. [1, 3]. В этом случае необходимо обеспечить условие однородности потоков, выполнение которого состоит в выборе однотипных ТС. При таком

подходе возможные состояния ТС можно представить как результат воздействия случайных потоков отказов и восстановлений. Процесс смены состояний, происходящий в системе, состоит в том, что через случайный промежуток времени T_i (наработка на отказ) вышедший из строя i -й узел восстанавливается в течение времени t_i [4, 5].

С учетом принятых ограничений структурную схему модели анализа эффективности системы на примере гибкого производственного модуля (ГПМ) можно представить в следующем виде (рис. 1).

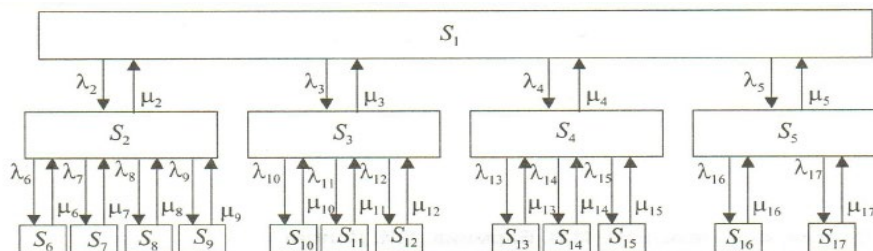


Рисунок 1. Размеченный граф состояний технологической системы ГПМ

Система массового обслуживания (СМО) может находиться в одном из следующих n состояний:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} (n = 17).$$

Процесс, протекающий в СМО, состоит в том, что в случайные моменты времени система под воздействием потоков событий переходит из одного состояния в другое. Потоки можно условно разделить на две группы: потоки заявок и потоки обслуживаний. Поступившая заявка немедленно начинает обслуживаться. Среднее время T_i пребывания в этом состоянии S_i определяет его финальную вероятность [6, 7]:

$$p_i = T_i / T_\phi,$$

где T_ϕ – время работы системы. Обозначив финальные вероятности состояний через p_i , где i – номер состояния S_i ($i = 1, \dots, n$), составим систему уравнений Колмогорова [1, 3, 7] для всех n состояний в принятой на рис. 1 системе обозначений:

$$\begin{aligned} p_1 \sum_{i=2}^5 \lambda_i &= \sum_{i=2}^5 p_i \mu_i, \\ p_2 \left(\mu_2 + \sum_{i=6}^9 \lambda_i \right) &= p_1 \lambda_2 + \sum_{i=6}^9 p_i \mu_i, \\ p_3 \left(\mu_3 + \sum_{i=10}^{12} \lambda_i \right) &= p_1 \lambda_3 + \sum_{i=10}^{12} p_i \mu_i, \\ p_4 \left(\mu_4 + \sum_{i=13}^{15} \lambda_i \right) &= p_1 \lambda_4 + \sum_{i=13}^{15} p_i \mu_i, \\ p_5 \left(\mu_5 + \sum_{i=16}^{17} \lambda_i \right) &= p_1 \lambda_5 + \sum_{i=16}^{17} p_i \mu_i, \\ p_3 \lambda_{10} &= p_{10} \mu_{10}, \quad p_3 \lambda_{11} = p_{11} \mu_{11}, \\ p_3 \lambda_{12} &= p_{12} \mu_{12}, \quad p_3 \lambda_{13} = p_{13} \mu_{13}, \\ p_3 \lambda_{14} &= p_{14} \mu_{14}, \quad p_3 \lambda_{15} = p_{15} \mu_{15}, \\ p_3 \lambda_{16} &= p_{16} \mu_{16}, \quad p_3 \lambda_{17} = p_{17} \mu_{17}. \end{aligned} \tag{1}$$

Запишем уравнение нормировки

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2)$$

и решим систему уравнений (1) относительно искомым неизвестных p_i ($i = 1, \dots, n$). Получим решение системы уравнений (1) с соблюдением условия (2) для произвольно заданных значений интенсивностей потоков и найдем значения интенсивностей, которые обеспечат требуемые вероятности состояний. Для примера зададим вероятности состояний, выполнив условие (2), по уровням иерархии:

$$p_1 = 0.6, p_2, \dots, p_5 = 0.5, p_6, \dots, p_{17} = 0.0167. \quad (3)$$

Система (1) является линейной, а для её решения нужно задать n неизвестных, в качестве которых выберем интенсивности потоков, подлежащие коррекции. Для технических систем в качестве корректируемых принимаем потоки восстановлений, так как потоки отказов обусловлены технологией изготовления, выбором материалов, конструктивными особенностями и другими причинами, возникающими при производстве конкретной ТС. Для систем обслуживания целесообразно выбирать в качестве корректируемых интенсивности потоков обслуживания, параметры которых можно изменять путём проведения организационно-технических мероприятий.

Введя в систему уравнений (1) желаемые значения вероятностей (3), задаём с помощью генератора случайных чисел множество значений параметров потоков заявок на обслуживание:

$$\mu = \begin{Bmatrix} 0.902; & 0.394; & 0.915; & 0.893; & 0.371; & 0.205; & 0.248; & 0.156; \\ 0.616; & 0.276; & 0.274; & 0.412; & 0.067; & 0.503; & 0.316; & 0.718 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

В результате решения системы уравнений (1) с учетом множеств (3) и (4) определим требуемые значения интенсивностей потоков обслуживаний:

$$\lambda = \begin{Bmatrix} 0.0752; & 0.0328; & 0.0762; & 0.0744; & 0.124; & 0.0683; & 0.0827; & 0.052; \\ 0.205; & 0.0920; & 0.0913; & 0.137; & 0.0223; & 0.168; & 0.105; & 0.239 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Подставив в систему (1) найденные значения λ из (5), заданные значения μ из (4), введя условие нормировки (2) и решив систему уравнений относительно

p_i ($i = 1, \dots, n$), получаем в результате заданные значения вероятностей состояний (3).

В общем случае, создавая произвольные комбинации неизвестных из множеств p_i ($i = 1, \dots, n$), λ_j ($j = 2, \dots, n$) и μ_j ($j = 2, \dots, n$) в количестве, равном числу уравнений n системы (1), можно решать задачи коррекции СМО в различных постановках, допускающих уточнение параметров системы. Среди возможных комбинаций необходимо исключить такие, при которых заданы все входящие и исходящие потоки хотя бы одного из состояний, приводя систему уравнений к несовместному виду. На рис. 2 изображены гистограммы распределения параметров ТС до и после введения коррекции интенсивностей потоков, реализованной путём решения системы уравнений (1) с помощью MAPLE-программы Sistem_Hqs [7] при выборе в качестве неизвестных комбинации части λ -потоков:

$$\lambda = \begin{Bmatrix} \lambda_2; & \lambda_3; & \lambda_4; & \lambda_5; & \lambda_6; & \lambda_7; & \lambda_8; & \lambda_9; \\ 0.232; & 0.429; & 0.592; & 0.0692; & 0.627; & 0.398; & 0.611; & 0.418 \end{Bmatrix}, \text{ и } \mu\text{-потоков:}$$

$$\mu = \begin{Bmatrix} 0.902; & 0.394; & 0.915; & 0.893; & 0.371; & 0.205; & 0.248; & 0.156; \\ \mu_{10}; & \mu_{11}; & \mu_{12}; & \mu_{13}; & \mu_{14}; & \mu_{15}; & \mu_{16}; & \mu_{17} \end{Bmatrix} \text{ с заданными вероятностями состояний (3).}$$

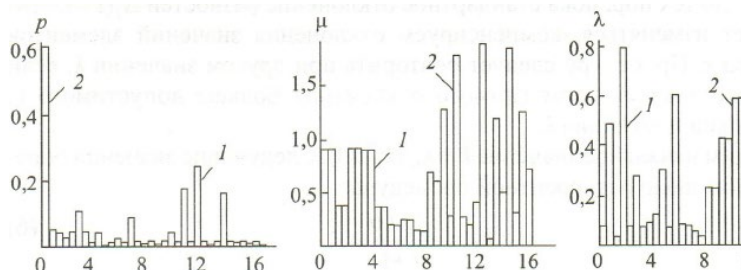


Рисунок 2. Гистограммы распределения параметров системы до (1) и после (2) введения коррекции интенсивностей потоков

Изображенные гистограммы распределения вероятностей состояний

p_i ($i = 1, \dots, n$) и интенсивностей потоков μ_i и λ_i ($i = 2, \dots, n$) до ввода коррекции обозначены цифрой 1, а после ввода – цифрой 2.

В общем случае количество корректируемых параметров системы m , подлежащее определению, может не совпадать с числом уравнений n системы (1). При этом указанная система уравнений может оказаться недоопределённой (при $m > n$) или переопределённой (при $m < n$). Множество корректируемых параметров может содержать элементы λ -потоков и μ -потоков, а при произвольном выборе λ_i и μ_i ($i = 2, \dots, n$) для коррекции система уравнений (1) может оказаться несовместной.

Рассмотрим алгоритм для решения с заданной точностью совместной системы (1). Объединим подлежащие коррекции потоки в множество $x = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\}$, где $x_i \in (\lambda / \mu)$ является элементом множества λ либо множества μ . Будем считать заданными все вероятности множества состояний P и известными начальные значения всех потоков. Решив систему уравнений (1) относительно p найдём среднее квадратичное отклонение разностей:

$$\Delta_i = P_i - p_i \quad (i = 1, \dots, n).$$

Введём допустимое значение стандартного отклонения ε . Процедура компенсации заключается в адаптации параметров ТС по критерию $\min \varepsilon$. Умножаем на k величину x_i , получив $x_i = x_i k$ ($k \neq 1$), что приведёт к перераспределению вероятностей состояний системы p . Если в результате этого стандартное отклонение разностей Δ_i ($i = 1, \dots, n$) уменьшится, то сохраняем изменённую величину $x_i = x_i k$. В ином случае оставляем x_i неизменным. Повторяя этот процесс для всех m элементов множества x при выбранном значении множителя k и обратном его значении k^{-1} до тех пор, пока стандартное отклонение разностей Δ_i ($i = 1, \dots, n$) перестанет изменяться, компенсируем отклонения значений элементов множества x . Процедуру необходимо повторить при другом значении k , если полученное значение стандартного отклонения больше допустимого ε . Находим закон изменения k .

Задаём начальное значение

$$k = k_0 \quad (k_0 \neq 1).$$

Следующие значения определим с помощью рекуррентной процедуры:

$$k_i = \frac{k_{i-1} + \alpha}{\alpha + 1}, \quad (6)$$

где $\alpha > 0$. Выполняя последовательно подстановки в формулу (6) и приведя результат к полиномиальной форме, получаем:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{k_0 + \alpha}{\alpha + 1}, \\
 k_2 &= \frac{k_0 + 2\alpha + \alpha^2}{(\alpha + 1)^2}, \\
 k_3 &= \frac{k_0 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3}{(\alpha + 1)^3}, \\
 &\dots\dots\dots \\
 k_i &= \frac{k_0 + \sum_{j=1}^i C_i^j \alpha^j}{(\alpha + 1)^i},
 \end{aligned}$$

где C_i^j – биномиальный коэффициент. Для k_i и k_i^{-1} при начальном значении k_0 в компактной форме запишем

$$\begin{aligned}
 k_i &= \frac{k_0 - 1}{(\alpha + 1)^i} + 1, \\
 k_i^{-1} &= \frac{(\alpha + 1)^i}{k_0 - 1 + (\alpha + 1)^i},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $(\alpha + 1)^i = \sum_{j=0}^i C_i^j \alpha^j$. Из выражения (7) следует, что в пределе при неограниченном увеличении значения i множитель имеет вид

$$k_\infty = \lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{k_0 - 1}{(\alpha + 1)^i} + 1 \right) = 1,$$

что справедливо и для k_∞^{-1} .

Определяем закон изменения шага h_j , с которым происходит компенсация x_j ($j = 1, \dots, m$), соответствующего значению множителя k_i либо k_i^{-1} . Для i -го шага итерации запишем уравнения

$$\begin{aligned}
 x_j k_i &= x_j + h_j, \\
 x_j k_i^{-1} &= x_j + h_j
 \end{aligned}$$

решив которые, получим

$$h_j = \begin{cases} x_j (k_i - 1), \\ x_j (k_i^{-1} - 1) \end{cases} \tag{8}$$

Подставив в (8) k_i и k_i^{-1} из (7), после преобразований найдём

$$h_j = \begin{cases} x_j \frac{k_0 - 1}{(\alpha + 1)^i}, & k_i, \\ x_j \frac{1}{(\alpha + 1)^i / (1 - k_0) - 1}, & k_i^{-1}. \end{cases} \tag{9}$$

Рассмотрим характер изменения шага h_j

$h_j = x_j \beta_i$, где β_i - относительная величина шага,

$$\beta_i = \begin{cases} x_j \frac{k_0 - 1}{(\alpha + 1)^i}, & k_i, \\ x_j \frac{1}{(\alpha + 1)^i / (1 - k_0) - 1}, & k_i^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

Найдем предельные значения β_i . Начальное значение β_0 получим, подставив в (10) $i=0$:

$$\beta_0 = \begin{cases} k_0 - 1, & k_i, \\ x_j \frac{1 - k_0}{k_0}, & k_i^{-1}. \end{cases}$$

В пределе при $i \rightarrow \infty$ имеем $\beta_i /_{i \rightarrow \infty} \rightarrow 0$. Таким образом, абсолютная величина шага h_j монотонно уменьшается, стремясь к нулю с возрастанием числа инерций i .

На рис. 3 показан характер изменения относительной величины шага (10) при двух значениях $\alpha = \alpha_1$ и $\alpha = \alpha_2$, где $\alpha_1 = 1,5$, $\alpha_2 = 3$ и $k_0 = 0,8$. При $k_0 = 1/0,8$ характер графиков β_i не изменится.

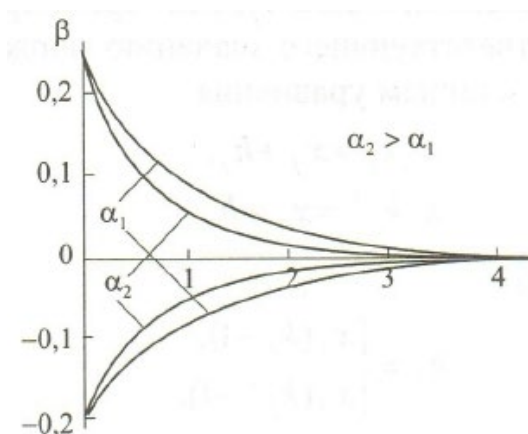


Рисунок 3. Характер изменения относительной величины шага при $\alpha_1 = 1,5$ и $\alpha_2 = 3$

При решении задачи коррекции возможны затруднения, когда число неизвестных m множества x превышает число уравнений n системы. Такая система не имеет единственного решения. Примером получения приближенного решения может служить предельный случай:

$$m = 2(n - 1),$$

когда подлежат коррекции интенсивности всех потоков $x = \{\lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu_2, \dots, \mu_n\}$, заданы требуемые вероятности состояний системы (3), начальные значения корректируемых потоков $\lambda = \{\lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, $\mu = \{\mu_2, \dots, \mu_n\}$ и допустимое стандартное отклонение погрешности $\varepsilon = 10^{-4}$. Выбираем начальные значения $k_0 = 0,8$ и μ (4), а также задаём случайные значения λ :

$$\lambda = \begin{Bmatrix} 0.485 & 0.791; & 0.282; & 0.0937; & 0.304; & 0.601; & 0.0768; & 0.0333; \\ 0.232; & 0.429; & 0.592; & 0.0692; & 0.627; & 0.398; & 0.611; & 0.418 \end{Bmatrix}$$

На рис. 4 начальные значения потоков μ и λ обозначены цифрой 1, а полученные в результате MAPLE-процедуры (Recurrent_Hqs.mws) – цифрой 2. Гистограмма распределения вероятностей состояний совпадает с представленной ранее на рис. 2 [7]. График её погрешности показан на рис. 5.

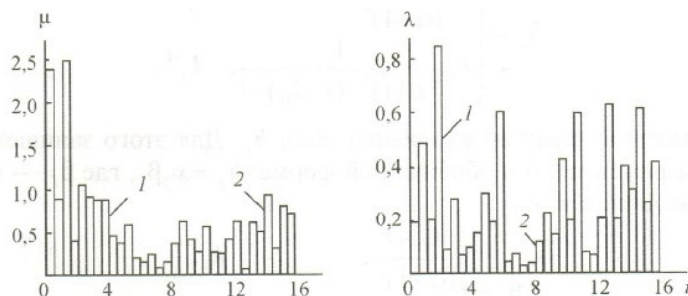


Рисунок 4. Гистограммы распределения параметров системы до (1) и после (2) MAPLE-процедуры компенсации

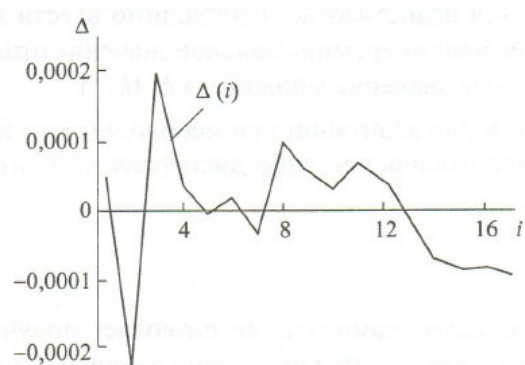


Рисунок 5. График погрешности распределения вероятностей состояний после процедуры компенсации

Изменения стандартного отклонения s приведены на графике (рис. 6, а), а относительного изменения величины шага (10) для k_i (ниже оси абсцисс) и k_i^{-1} (выше этой оси) при $k_0=0,8$ – на графике (рис. 6, б).

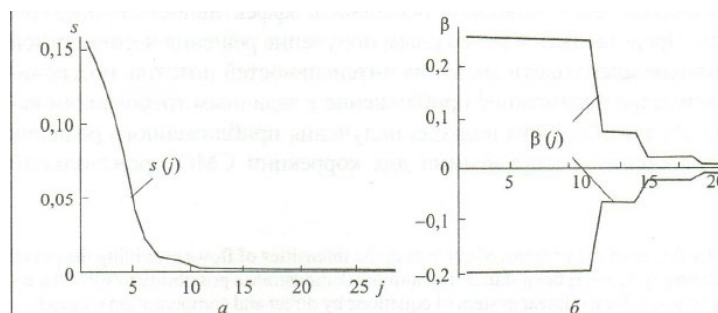


Рисунок 6. Характер изменения стандартного отклонения (а) и относительного изменения (б) величины шага

В полученном решении с заданным стандартным отклонением ($\varepsilon=10^{-4}$) стандартное отклонение погрешности Δ_i ($i = 1, \dots, n$) составляет $s_j = 0,9 \cdot 10^{-4}$ при $j=29$ и $\beta_j = \pm 0,0074$.

В случае, когда хотя бы для одного состояния системы заданы все входящие и исходящие потоки (для несовместной системы уравнений), использование адаптации с помощью процедуры компенсации интенсивностей потоков множества x , позволяет получить распределение искомых интенсивностей потоков, обеспечивающее максимально возможное приближение к желаемому распределению вероятностей состояний системы. Так как условие $s_j < \varepsilon$ при решении несовместной системы уравнений в большинстве случаев невыполнимо, целесообразно ввести дополнительные ограничения, например, по минимальному значению относительного шага β_i или предельному значению множителя k_i (k_i^{-1}). В качестве критерия адаптации можно применять стандартное отклонение или дисперсию относительной погрешности Δ_i / P_i ($i = 1, \dots, n$).

Проведенные мероприятия позволяют получить приближенное решение совместной системы уравнений с допустимой погрешностью при произвольном соотношении числа уравнений и числа неизвестных [7, 8]. Применение стандартного отклонения погрешности в качестве критерия выбора шага позволяет обеспечить эффективность процедуры компенсации. Обеспечивается возможность получения решения несовместной системы для нахождения параметров интенсивностей потоков с максимально возможным приближением к заданным требованиям качества технологической системы на примере ГПМ.

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
2. Нахапетян Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
3. Долгин В.П. Надежность технических систем: учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2015. – 167 с.
4. 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.
5. Харченко А.О. Разработка гибких производственных модулей с учетом надежности технологических систем / А.О. Харченко. – Киев: Общество «Знание», 1989. – 20 с.
6. 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.
7. Долгин В.П. Надежность в машиностроении. Методические указания к выполнению расчетно-графического задания / В.П. Долгин, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – 27 с.
8. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении: учебное пособие / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.