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

№ 4(8)
2017

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении» (11 – 15 сентября 2017 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 17-08-20448)*

Севастополь 2017

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – ГОЛОВИН В.И.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

БАКУЛИНА А.Н.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н., проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ВЕТРОГОН А.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., проф. (г. Белгород)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МЕШКОВ В.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НЕМЕНКО А.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НИЧКОВА Л.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СЕВРИКОВ В.В.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Санкт-Петербург)
ФИЛИПОВИЧ О.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ХАРЧЕНКО А.О.	к. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Бакулина А. Н., Фоменко И.А. Разработка методики калибровки вольтметров постоянного тока и оценивание неопределенности результатов измерений.....	4
Бородулин А.С., Малышева Г.В. Экспериментальные исследования кинетики процесса пропитывания волокон эпоксидными связующими.....	11
Братан С.М., Колесов А.Г., Рошупкин С.И. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании токопроводящих хрупких материалов.....	16
Братан С.М., Колесов А.Г., Т.В. Стадник, Рошупкин С.И. Стратегия управления процессами ленточного шлифования в автоматизированном производстве.....	23
Ерёменко Д.О., Покинтелица Н.И. Энергосберегающая технология парокompрессионной перегонки с дополнительным источником тепла.....	29
Коротков В.А. Закалочная установка УДГЗ-200 для снижения себестоимости изготовления и увеличения долговечности деталей и штампов.....	34
Мулюхин Н.В., Лобанов В.Д. Моделирование безрезонансных вибрационных систем.....	38
Новиков П.А. Параметрический синтез стружечной канавки деформирующе-режущих метчиков.....	43
Сигора Г.А., Ничкова Л.А., Хоменко Т.Ю. Выбор оптимальной системы опреснения морской воды для Крымского региона.....	48
Столяров Н.Н., Мерзлов А.В. Моделирование износа абразивного инструмента для решения задачи коррекции цикла управления операцией чистового шлифования.....	56
Шелковой А.Н., Ключко А.А., Гасанов М.И. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес.....	61

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

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

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Associate Prof. – GOLOVIN V.I.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

BAKULINA A.N.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
VETROGON A.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
DUYUN T.A.	D.Sc., Prof. (Belgorod)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MESHKOV V.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NEMENKO A.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NICHKOVA L.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SEVRIKOV V.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (St. Petersburg)
FILIPOVICH O.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
KHARCHENKO A.O.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Bakulina A.N., Fomenko I.A. Development of calibration methods of dc voltmeters and the evaluation of uncertainty of measurement results	4
Borodulin A.S., Malysheva G.V. Experimental researches of kinetics of the process of protection of fibers by epoxy binders	11
Bratan S.M., Kolesov A.G., Roshchupkin S.I. Identification of removal parameters of combined grinding the conductive brittle materials.....	16
Bratan S.M., Kolesov A.G., Stadnik T.V., Roshchupkin S.I. The strategy of control processes of belt grinding in automated production.....	23
Eremenko D.O., N.I. Pokintelitsa N.I. Energy-saving technology vapor compression distillation with an additional source of heat.....	29
Korotkov V.A. Hardening plant UDGZ-200 to reduce production costs and increase the durability of parts and stamps	34
Muliukhin N.V., Lobanov D.V. Simulation of non-resonant vibration systems	38
Novikov P.A. Parametric synthesis of the flute of deforming-cutting taps	43
Sigora G.A., Nichkova L.A., Khomenko T.Y. The choice of the optimal desalination systems of sea water for the Crimean region	48
Stolyarov N.N., Merzlov A.V. Modeling of wear of the abrasive tool to solve the problem of correcting the management cycle of fine grinding operation.....	56
Shelkovoy A.N., Klochko A.A., Hasanov M.I. Providing the operating properties of the combined gear wheels.....	61

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation

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

УДК 621.317.089.6

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ ВОЛЬТМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

А.Н. Бакулина¹, И.А. Фоменко²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация² ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Севастополь», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена анализу видов и методов измерения электрических величин. Обоснована актуальность проведения процедур поверки и калибровки средств измерений электрических величин на примере измерения напряжения с помощью вольтметров постоянного тока. Рассмотрены существующие схемы поверки вольтметров, приведены структура и состав эталонной базы для поверки вольтметров постоянного тока. Приведены основные положения разработанной методики калибровки вольтметра, а также оборудование, используемое при проведении калибровки и необходимые условия.

В работе также проведена оценка неопределенности результатов измерений и представлено выражение для расчета суммарной стандартной неопределенности измерения и расширенной неопределенности измерения.

Ключевые слова: средства измерения, поверка вольтметра, калибровка вольтметра, неопределенность результатов измерения.

DEVELOPMENT OF CALIBRATION METHODS OF DC VOLTMETERS AND THE EVALUATION OF UNCERTAINTY OF MEASUREMENT RESULTS

A.N. Bakulina¹, I.A. Fomenko²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² FBO "State regional center of standardization, metrology and tests in Sevastopol" Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to analysis of the types and methods of measurement of electrical units. The urgency of conducting the procedures of verification and calibration of measuring electrical quantities, for example, measure voltage using DC voltmeter. The existing calibration schemes for the voltmeters, the structure and the composition of the reference base for calibration of DC voltmeter were observed. The main provisions of the developed calibration method of the voltmeter and also the equipment used during the calibration and the necessary conditions.

The article also assessed the uncertainty of measurement result and shows the expression for calculating the combined standard measurement uncertainty and the expanded measurement uncertainty.

Keywords: measuring facilities, check of voltmeter, calibration of voltmeter, vagueness of measuring results.

Введение

Развитие науки и техники всегда было тесно связано с прогрессом в области измерений. Большое значение измерений для науки подчёркивали некоторые учёные – Г. Галилей: «Измеряй всё доступное измерению и делай доступное всё недоступное ему», Д.И. Менделеев: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немыслима без меры», Кельвин:

«Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой её можно измерить» [1].

Измерения являются одним из основных способов познания природы, её явлений и законов [2]. Каждому, новому открытию в области естественных и технических наук предшествует большое число различных измерений.

Электрические измерения – один из распространённых видов измерений. К электрическим измерениям относят измере-

ния электрических величин: электрического напряжения, электрического сопротивления, силы тока, частоты и фазы переменного тока, мощности тока, электрической энергии, электрического заряда, индуктивности, электрической ёмкости и др. Благодаря созданию электротехнических устройств, преобразующих различные неэлектрические величины в электрические, методы и средства электрических измерений используются при измерениях практически всех физических величин [3]. Область применения электрических измерений: научные исследования в физике, химии, биологии и др., технологические процессы в энергетике, металлургии, химической промышленности, транспорт, разведка и добыча полезных ископаемых, метеорологические и океанологические работы, медицинская диагностика, изготовление и эксплуатация радио и телевизионных устройств, самолётов и космических аппаратов [4].

Обеспечение точности измерений

Большое разнообразие электрических величин, широкие диапазоны их значений, требования высокой точности измерений, разнообразие условий и областей применения электрических измерений обусловили многообразие методов и средств электрических измерений [5].

Методы и средства электрических измерений в цепях постоянного и переменного тока существенно различаются. В цепях переменного тока они зависят от частоты и характера изменения величин, а также от того, какие характеристики переменных электрических величин измеряются. Для электрических измерений в цепях постоянного тока наиболее широко применяют измерительные магнитоэлектрические приборы и цифровые измерительные устройства. Для электрических измерений в цепях переменного тока – электромагнитные приборы, электродинамические приборы, индукционные приборы, электростатические приборы, выпрямительные электроизмерительные приборы, осциллографы, цифровые из-

мерительные приборы. Некоторые из перечисленных приборов применяют для электрических измерений как в цепях переменного, так и постоянного тока [6].

Значения измеряемых электрических величин заключаются примерно в пределах: силы тока – от 10^{-16} до 10^5 А, напряжения – от 10^{-9} до 10^7 В, сопротивления – от 10^{-8} до 10^{16} Ом, мощности – от 10^{-16} Вт до десятков ГВт, частоты переменного тока – от 10^{-3} до 10^{12} Гц. Диапазоны измеряемых значений электрических величин имеют непрерывную тенденцию к расширению. Измерения на высоких и сверхвысоких частотах, измерение малых токов и больших сопротивлений, высоких напряжений и характеристик электрических величин в мощных энергетических установках выделились в разделы, развивающие методы и средства электрических измерений. Расширение диапазонов измерений электрических величин связано с развитием техники электрических измерительных преобразователей, в частности с развитием техники усиления и ослабления электрических токов и напряжений [7].

Пределы допускаемых погрешностей электрических измерений колеблются приблизительно от единиц до $10^{-4}\%$. Для сравнительно грубых измерений пользуются измерительными приборами прямого действия. Для более точных измерений используются методы, реализуемые с помощью мостовых и компенсационных электрических цепей [8].

Применение методов электрических измерений для измерения неэлектрических величин основывается на известной связи между неэлектрическими и электрическими величинами, либо на применении измерительных преобразователей (датчиков). Всё более широкое распространение в качестве промежуточных измерительных преобразователей получают цифровые преобразователи. В зависимости от того, как получают результаты измерения, различают измерения прямые, косвенные, совместные и совокупные [9].

В настоящее время действует стандарт ГОСТ 8.027-2001, который распространяется на государственную поверочную схему

для средств измерений постоянного электрического напряжения (далее - напряжение) и электродвижущей силы (далее - ЭДС) в диапазоне до 1000 В и устанавливает порядок передачи размера единицы напряжения - вольта (В) от государственного первичного эталона единицы напряжения с помощью вторичных и рабочих эталонов рабочим средствам измерений с указанием погрешностей и основных методов поверки [10].

В настоящее время применяются схемы поверки, представленные на (рис. 1-3).

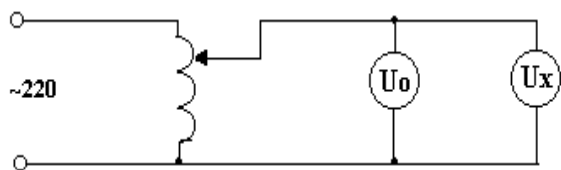


Рис. 1. Схема поверки вольтметра на переменном токе

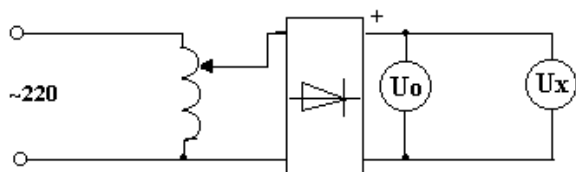


Рис. 2. Схема поверки вольтметра на постоянном токе



Рис. 3. Схема поверки вольтметра на высоких частотах

В состав государственного первичного эталона входят:

- мера напряжения для воспроизведения единицы напряжения: криогенные преобразователи частоты в напряжение на основе эффекта Джозефсона и аппаратура для синтеза частоты облучения криогенных преобразователей, включая стандарт частоты и времени, синтезатор и генератор СВЧ диапазона с волноводным выходом, блок фазовой автоподстройки частоты;
- аппаратура для контроля условий измерений и неизменности воспроизводимого и хранимого размера единицы напряжения;
- аппаратура для передачи размера единицы напряжения.

Номинальные значения напряжений, воспроизводимых государственным первичным эталоном, составляют 1 В и 10 В.

Государственный первичный эталон воспроизводит единицу напряжения на основе использования значения константы Джозефсона K_J со средним квадратическим отклонением (далее - СКО) результатов измерений S_0 , не превышающим $1 \cdot 10^{-9}$ при 20 независимых измерениях. Неисключенная систематическая погрешность (НСП) θ_0 не превышает $1 \cdot 10^{-9}$.

Государственный первичный эталон применяют для передачи размера единицы напряжения вторичным эталонам сличением с помощью компаратора (компаратора напряжений или нановольтметра). СКО метода передачи размера единицы S_{∞} составляет $(0,5 - 5,0) \cdot 10^{-9}$.

В состав государственного первичного эталона входят:

- мера напряжения для воспроизведения единицы напряжения: криогенные преобразователи частоты в напряжение на основе эффекта Джозефсона и аппаратура для синтеза частоты облучения криогенных преобразователей, включая стандарт частоты и времени, синтезатор и генератор СВЧ диапазона с волноводным выходом, блок фазовой автоподстройки частоты;
- аппаратура для контроля условий измерений и неизменности воспроизводимого и хранимого размера единицы напряжения;
- аппаратура для передачи размера единицы напряжения.

Номинальные значения напряжений, воспроизводимых государственным первичным эталоном, составляют 1 В и 10 В.

Государственный первичный эталон воспроизводит единицу напряжения на основе использования значения константы Джозефсона K_J со средним квадратическим отклонением (далее - СКО) результатов измерений S_0 , не превышающим $1 \cdot 10^{-9}$ при 20 независимых измерениях. Неисключенная систематическая погрешность (НСП) θ_0 не превышает $1 \cdot 10^{-9}$.

Государственный первичный эталон применяют для передачи размера единицы напряжения вторичным эталонам сличением

ем с помощью компаратора (компаратора напряжений или нановольтметра). СКО метода передачи размера единицы $S_{\Sigma 0}$ составляет $(0,5 - 5,0) \cdot 10^{-9}$.

В качестве вторичных эталонов используют эталон-копию и эталон сравнения [11].

Номинальные значения напряжения и ЭДС эталона-копии составляют 1 В и 10 В.

СКО результатов сличений эталона-копии с государственным первичным эталоном $S_{\Sigma 0}$ при 60 независимых измерениях не должно превышать $1,3 \cdot 10^{-8}$ при номинальном значении напряжения 1 В и $3 \cdot 10^{-8}$ при номинальном значении напряжения 10 В.

Предел допускаемой нестабильности во эталона-копии за межповерочный интервал не должен превышать:

– $1 \cdot 10^{-7}$ для среднего значения ЭДС группы НЭ;

– $3 \cdot 10^{-7}$ для мер напряжения на стабилитронах.

Эталон-копию применяют для передачи размера единицы напряжения рабочим эталонам 0 разряда и поверки рабочих средств измерений классов точности от 0,00005 до 0,0002 сличением с помощью компаратора (потенциометра постоянного тока, компаратора напряжений, нановольтметра или транспортируемой меры напряжения на стабилитронах из состава эталона-копии). СКО метода передачи размера единицы $S_{\Sigma 0}$ составляет $(1,5 - 3,0) \cdot 10^{-8}$.

В качестве эталона сравнения используют транспортируемую меру напряжения на основе эффекта Джозефсона.

Номинальные значения напряжения эталона сравнения составляют 1 В и 10 В.

СКО результатов сличений эталона сравнения с государственным первичным эталоном $S_{\Sigma 0}$ при 30 независимых измерениях не должно превышать $2 \cdot 10^{-9}$.

Предел допускаемой нестабильности V_0 эталона сравнения за цикл сличений не должен превышать $1 \cdot 10^{-9}$.

Эталон сравнения применяют для сличений государственного первичного эталона с рабочими эталонами 0 разряда, имеющими в составе меру напряжения на основе эффекта Джозефсона, и поверки рабочих средств измерений класса точности

0,000005, а также для международных сличений с национальными эталонами других стран сличением с помощью компаратора. СКО метода передачи размера единицы напряжения $S_{\Sigma 0}$ составляет $(0,5 - 5,0) \cdot 10^{-9}$.

В качестве рабочих эталонов (далее – РЭ) 0 разряда используют:

а) группу термостатированных насыщенных НЭ с мерами напряжения на стабилитронах или без них;

б) группу термостатированных насыщенных НЭ с мерами напряжения на стабилитронах (включая транспортируемые) или без них в комплекте с мерой напряжения на основе эффекта Джозефсона;

в) меру напряжения на основе эффекта Джозефсона.

Методика калибровки вольтметров

При проведении калибровки выполняют следующие операции [12]:

- внешний осмотр;
- опробование;
- оценивание неопределенности;

При проведении калибровки применяют эталонные установки, рабочие средства измерительной техники, вспомогательное оборудование и материалы, указанные в нормативных документах и в табл. 1.

Таблица 1. Оборудование, используемое при калибровке вольтметров

Наименование операции	Оборудование, используемое при проведении калибровки
Определение величины постоянного напряжения электрического тока	Калибратор программируемый ПЗ20, № 0269, $10^{-5} - 10^3$ В, $10^{-9} - 10^{-1}$ А, $U=0,9 \times 10^{-3}$ мВ – $0,7 \times 10^{-3}$ В, $U=1,1 \times 10^{-3}$ мА – $1,2 \times 10^{-3}$ мА

Калибровка производится по диапазонам измерения в зависимости от требований заказчика. СИ, применяемые при калибровке, должны быть калиброваны, вспомогательное оборудование должно быть аттестовано в установленном порядке.

При проведении калибровки необходимо соблюдать требования «Правил техни-

ческой эксплуатации электроустановок потребителей», а также требования безопасности, приведенные в эксплуатационной документации СИ и вспомогательного оборудования.

К проведению калибровки допускаются специалисты, которые изучили эксплуатационную документацию на приборы и средства калибровки, требования безопасности на рабочем месте и прошли инструктаж по охране труда в установленном порядке.

Калибровку приборов проводят при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха – $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$;
- относительная влажность воздуха – от 30 до 80 %;
- атмосферное давление – (100 ± 6) кПа;
- напряжение сети питания – $(220 \pm 4,4)$ В;
- частота сети питания – $50 \text{ Гц} \pm 0,5 \text{ Гц}$.

Приборы должны быть подготовлены к калибровке в соответствии с НТД на приборы конкретных типов.

Приборы допускается калибровать без взаимозаменяемых вспомогательных частей.

Приборы, применяемые с ограниченно взаимозаменяемыми и невзаимозаменяемыми вспомогательными частями, калибруют совместно с последними.

Приборы, отградуированные калиброванными проводами, калибруют совместно с этими проводами.

Проведение калибровки:

1. Внешний осмотр проводят в соответствии с требованиями нормативных документов и технических описаний на калибруемый прибор.

2. Опробование производится в соответствии с НТД на прибор

3. Калибровка вольтметров постоянного тока проводится с использованием метода прямых измерений

Для определения необходимого набора точек калибровки необходимо рассмотреть принцип работы прибора, который калибруется, например, на основании указаний, приведенный в НД на данный прибор или выбранный заказчиком.

Калибровка вольтметров постоянного тока проводится с использованием калибратора П320.

4. Для определения необходимого набора точек калибровки необходимо рассмотреть принцип работы прибора, который калибруется, например, на основании указаний, приведенный в НД на данный прибор или выбранный заказчиком. Калибровку СИ проводят на конечных отметках шкал всех поддиапазонов измерений и на каждой числовой отметке шкал основных поддиапазонов измерений, указанных в НТД на прибор, если нет специальных требований заказчика.

Описание процесса измерения и представление его модели

Неопределенность результата калибровки определяют по типу А и В со следующими отличиями [13]:

– измерения проводят шесть раз – при возрастающих и убывающих значениях напряжений. Перед проведением каждого измерения при отключенном измеряемом напряжении (токе) проводят электрическую установку указателя отсчетного устройства прибора на нулевую или начальную отметку при закороченном входе или при подключенном ко входу СИ нагрузке в соответствии с требованиями ТД на калибруемый прибор.

В процессе осуществления калибровки осуществляется определение разности между результатом измерения выходной величины эталонной установки с помощью калибруемого СИ и номинальным значением установленного выходного значения величины, схема калибровки приведена на (рис. 4).

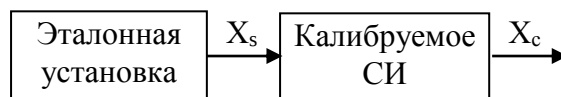


Рис. 4. Схема калибровки

Метод измерения основан на прямом многократном измерении напряжения (тока) эталонной установки с помощью калибруемого СИ [14].

Модельное уравнение в этом случае имеет вид:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - X_s, \quad (1)$$

где Δ – оценка выходной величины в точке калибровки; X_c – значение напряжения, которое было измерено калибруемым СИ; Δ_c – точность квантования калибруемого СИ; X_s – номинальное значение напряжения.

Оценивание неопределенности измерения

Модельному уравнению (1) будет соответствовать следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности измерения [15]:

$$u(\Delta) = \sqrt{u_{(\tilde{O}_c)}^2 + u_{(\Delta_c)}^2 + u_{(\tilde{O}_s)}^2}, \quad (2)$$

где $u_{(\tilde{O}_n)}$ – стандартная неопределенность по типу A определяемая по формуле (4); $u_{(\Delta_c)}$ – погрешность квантования измерительного прибора, определяемая по формуле (5); $u_{(\tilde{O}_s)}$ – стандартная неопределенность калибровки эталонной установки, указанная в сертификате о калибровке.

При многоразовых измерениях оценка x_c величины X_c определяется как среднее арифметическое результатов n наблюдений $\tilde{O}_{ci}$:

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{O}_{ci}, \quad (3)$$

$$u_{(\tilde{O}_c)} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\tilde{O}_{ci} - \tilde{o}_c)^2}, \quad (4)$$

$$u_{(\Delta_c)} = \frac{q}{4\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где q – единица деления шкалы калибруемого СИ.

Эффективное число степеней свободы ν_{eff} для этого случая будет определяться по формуле:

$$\nu_{eff} = (n-1) \left[u(\Delta) / u(x_c) \right]^4. \quad (6)$$

Расширенная неопределенность измерения при калибровке СИ определяется из выражения:

$$U(\Delta) = k \cdot u(\Delta), \quad (7)$$

где k – коэффициент охвата для вероятности 0,95.

Бюджет неопределенности измерений при калибровке вольтметра приведен в табл. 2. Запись результата измерения осуществляется в следующем виде:

$$\Delta = [\Delta \pm U(\Delta)] \text{ В}, \quad p=0,95 \quad (8)$$

Таблица 3 – Бюджет неопределенности измерений при калибровке СИТ

Входная величина	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности
X_c	x_c	(4)	–	$u(x_c)$
Δ_c	0	(5)	1	$u(\Delta_c)$
X_s	x_s	$\frac{U_s}{2}$	-1	$u(x_s)$
Выходная величина	Оценка выходной величины	Суммарная стандартная неопределенность	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность
Δ	(1)	(2)	$t_{0,95}(\nu_{eff})$	(7)

В настоящее время в Российской Федерации с переходом к рынку возникла необходимость поиска новых форм организации метрологической деятельности, которые соответствовали бы рыночным отношениям в экономике.

Контроль средств измерений на предмет их пригодности к применению в мировой практике осуществляется двумя основными видами: поверкой и калибровкой.

Таким образом, представлен разработанный проект методики калибровки вольтметров постоянного тока, а также проведены исследования, направленные на оценивание неопределенности результатов измерения напряжения.

Список литературы

1. Сергеев А.Г. Метрология: Учеб. пособие для вузов / А.Г.Сергеев, В.В.Крохин. – М.: Логос, 2001. – 408 стр.
2. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров / Я. Пиотровский. – М.: Мир, 1989. – 335 стр.
3. Алиев Т.М. Измерительная техника: Учеб. пособие для техн. вузов. / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров – М.: Высш. шк., 1991. – 384 стр.
4. Боднер В.А. Измерительные приборы (теория, расчет, проектирование): Учебн. для ВУЗов: в 2-х томах. / В.А. Боднер, А.В. Алферов – М.: Изд-во стандартов. Т2, - 1986. – 392 стр.
5. Таланчук П.М. Основы теории и проектирования измерительных приборов: Учеб. пособие. / П.М. Таланчук, В.Т. Рущенко - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 454 стр.
6. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые). / П.П. Орнатский – К.: Вища школа, 1986. – 504 стр.
7. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. / П.П. Орнатский – К.: Вища школа, 1983. – 455 стр.
8. Трофимов А.И. Приборы контроля ядерных энергетических установок: Учеб. пособие по курсу "Приборы контроля ЯЭУ" / А. И. Трофимов – Обнин. ин-т атом. энергетики, Физ.-энерг. фак. - Обнинск: ИАТЭ, 1991. – 232 стр.
9. Душин Е.М. Основы метрологии и электрические измерения. / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; под ред. Е.М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд - ние, 1987. – 480 стр.
10. ГОСТ 8.027-2001 Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического тока и электродвижущей силы
11. ГОСТ 8.497-83 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методика поверки»
12. ГОСТ Р 8.879-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению.
13. Руководство по выражению неопределенности измерения. / Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. – СПб: ГП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», 1999. – 134 стр.
14. ГОСТ Р 54500.1-2011 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения
15. ГОСТ Р 54500.3-2011 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

References

1. Sergeev A.G. Metrologija: Ucheb. posobie dlja vuzov / A.G.Sergeev, V.V.Krohin. – M.: Logos, 2001. – 408 str.
2. Piotrovskij Ja. Teorija izmerenij dlja inzhe-nerov / Ja. Piotrovskij. – M.: Mir, 1989. – 335 str.
3. Aliev T.M. Izmeritel'naja tehnika: Ucheb. posobie dlja tehn. vuzov. / T.M. Aliev, A.A. Ter-Hachaturov – M.: Vyssh. shk., 1991. – 384 str.
4. Bodner V.A. Izmeritel'nye pribory (teorija, raschet, proektirovanie): Uchebn. dlja VUZov: v 2-h tomah. / V.A. Bodner, A.V. Alferov – M.: Izd-vo standartov. T2, - 1986. – 392 str.
5. Talanchuk P.M. Osnovy teorii i proektirovanija izmeritel'nyh priborov: Ucheb. posobie. / P.M. Talanchuk, V.T. Rushhenko - K.: Vishha shk. Golovnoe izd-vo, 1989. – 454 str.
6. Ornatskij P.P. Avtomaticheskie izmerenija i pribory (analogovye i cifrovye). / P.P. Ornatskij – K.: Vishha shkola, 1986. – 504 str.
7. Ornatskij P.P. Teoreticheskie osnovy informacionno-izmeritel'noj tehniki. / P.P. Ornatskij – K.: Vishha shkola, 1983. – 455 str.
8. Trofimov A.I. Pribory kontrolja jadernyh jenergeticheskikh ustanovok: Ucheb. posobie po kursu "Pribory kontrolja JaJeU" / A. I. Trofimov – Obnin. in-t atom. jenergetiki, Fiz.-jenerg. fak. - Obninsk: IATJe, 1991. – 232 str.
9. Dushin E.M. Osnovy metrologii i jelektricheskie izmerenija. / B. Ja. Avdeev, E. M. Antonjuk, E. M. Dushin i dr.; pod red. E.M. Dushina. L.: Jenergoatomizdat, Leningr. otd - nie, 1987. – 480 str.
10. GOST 8.027-2001 Gosudarstvennaja poverochnaja shema dlja sredstv izmerenij postojannogo jelektricheskogo toka i jelektrodvishushhej sily.
11. GOST 8.497-83 «Gosudarstvennaja sistema obespechenija edinstva izmerenij (GSI). Ampermetry, vol'tmetry, vattmetry, varmetry. Metodika poverki».
12. GOST R 8.879-2014 Gosudarstvennaja sistema obespechenija edinstva izmerenij. Metodiki kalibrovki sredstv izmerenij. Obshhie trebovanija k soderzhaniju i izlozheniju.
13. Rukovodstvo po vyrazheniju neopredelennosti izmerenija. / Perevod s angl. pod nauch. red. prof. Slaeva V.A. – SPb: GP «VNIIM im. D.I.Mendeleeva», 1999. – 134 str.
14. GOST R 54500.1-2011 Neopredelennost' izmerenija. Chast' 1. Vvedenie v rukovodstva po neopredelennosti izmerenija.
15. GOST R 54500.3-2011 Neopredelennost' izmerenija. Chast' 3. Rukovodstvo po vyrazheniju neopredelennosti izmerenija.

К 620.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПРОПИТЫВАНИЯ ВОЛОКОН ЭПОКСИДНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ

А.С. Бородулин¹, Г.В. Малышева¹¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Москва, Российская федерация

Аннотация

Рассмотрена конструкция стенда, позволяющего исследовать кинетику процесса пропитывания в реальном масштабе времени в режимах смачивания и растекания. В качестве объектов исследования выбраны углеродные волокна и эпоксидные связующие. В результате проведенных экспериментальных исследований определены зависимости коэффициентов пропитывания от давления, установлены значения давлений, при которых происходит разрушение внешних и внутренних граничных слоев. Определены значения пределов текучести граничных слоев и их толщины.

Ключевые слова: волокно, эпоксидное связующее, углепластики, технологии формования.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF KINETICS OF THE PROCESS OF PROTECTION OF FIBERS BY EPOXY BINDERS

A.S. Borodulin¹, G.V. Malysheva¹¹Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation

Abstract

The construction of the new stand was created, allowing to investigate the kinetics of the process of impregnation in the real regime of time in the conditions of wetting and spreading, is considered. As the objects of research, carbon fibers and epoxy binders were chosen. As a result of the experimental studies, the dependences of the impregnation coefficients on pressure were determined, and the pressure at which the outer and inner boundary layers were destroyed was determined. The values of the yield strengths of the boundary layers and their thickness are determined.

Keywords: fiber, epoxy binder, carbon plastic, molding technology.

Введение

В настоящее время все более широкое распространение получают прямые методы формования [1-3], что связано с их низкой себестоимостью и удовлетворительным качеством.

Отличительной особенностью технологий прямого формования является совмещение процесса пропитывания ткани связующим и процесса формования готового изделий. К таким технологиям относятся: пропитка под давлением (Resin Transfer Molding или RTM), вакуумная инфузия (Vacuum Infusion или VARTM), пропитка пленочным связующим (Resin Film Infusion или RFI) и их многочисленные модификации [2, 4, 5].

Из всех методов прямого формования, наибольшее распространение получил метод вакуумной инфузии [6]. Однако при использовании инфузионной технологии пропитки под вакуумом оценка качества получаемых материалов на промежуточных операциях изготовления изделий затруднена. Это требует новых подходов к управлению технологией пропитывания наполнителей различной природы и геометрических размеров.

Течение жидкостей в капиллярно-пористом пространстве армирующей ткани зависит от суммарного воздействия многих факторов (динамического смачивания и растекания связующего, его химической природы, возможного фазового разделения под действием внешнего давления, масштабных факторов при капиллярной фильтрации, химической природы наполнителя и др.).

Влияние этого процесса на характеристики полимерных композиционных материалов усиливается еще и тем, что терморезактивные связующие характеризуются коллоидной структурой, на которую существенное влияние оказывает поверхность тканей. В результате структурообразования в процессе пропитывания возникают граничные слои, которые радикально влияют на технологический режим изготовления изделия.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование кинетики процессов пропитывания в режимах смачивания и растекания.

Методика исследований

Кинетику пропитывания непрерывных волокон различными жидкостями изучали на специально спроектированной установке, показанной на (рис. 1). Основным элементом установки являлась капиллярная трубка (1), в которую помещали волокно (2). Связующее подавали из специальной емкости (6). Скорость пропитывания оценивали по скорости движения газового пузырька. Пузырек получали методом «прокалывания» трубки, которая уже была заполнена жидкостью. Давление, под которым подавалась жидкость, регулировали компрессором (10), величину давления контролировали по манометру (7). На данном стенде подачу давления можно было осуществлять слева и справа от образца. При подаче слева определяли величину капиллярного давления, при подаче справа исследовали кинетику пропитывания.

Исследования вели в режимах смачивания и фильтрации, которые проводили последовательно один за другим. В режиме смачивания по скорости перемещения газового пузырька в капиллярной трубке строили зависимости $l=f(\tau)$. В режиме фильтрации измеряли скорость V движения жидкости в образце. Из зависимости $V=f(P)$ рассчитывали реологические параметры течения жидкости. Зависимости получали для нескольких значений степени наполнения капилляра волокном ϕ , которые изменялись в

диапазоне $25 \div 60$ об.%, что позволяло экспериментально определять пределы текучести граничных слоев жидкости и рассчитать их толщины.

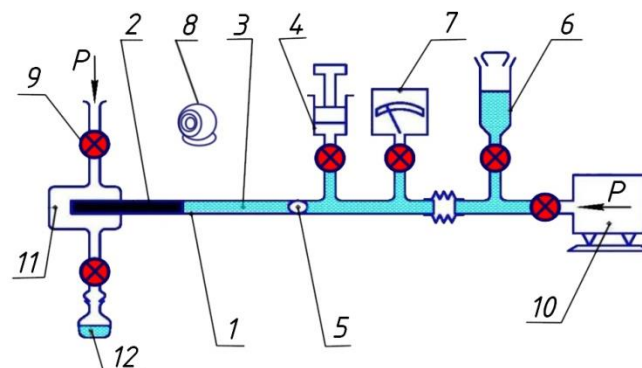


Рис. 1. Схема испытательной установки:

1 – капилляр; 2 – волокнистый образец; 3 – связующее; 4 – емкость с газом; 5 – газовый пузырек; 6 – емкость с жидкостью; 7 – манометр; 8 – веб-камера; 9 – вакуумные краны; 10 – компрессор; 11 – камера противодавления; 12 – ловушка для жидкости

Результаты и обсуждение

Экспериментально были установлены зависимости времени пропитывания от длины пропитанной части волоконного образца. Используя уравнение Уошборна, эти зависимости строились в координатах «длина пропитанного образца-квадратный корень от времени пропитывания» (рис. 2).

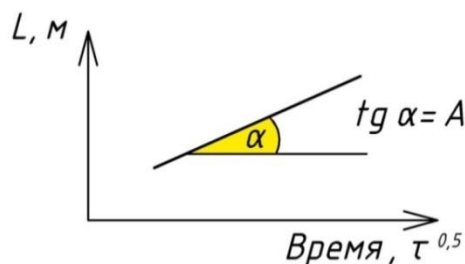


Рис. 2. Зависимость длины пропитываемого образца от времени

Коэффициент пропитывания «А», равный тангенсу угла наклона этой прямой, является функцией 4-х переменных: плотности жидкости, эффективного радиуса капилляра, динамическому углу натекания и вязкости жидкости. В отсутствии внешнего давления в системе, волокно пропитывается под действием капиллярной силы (P_k). При повы-

шении давления до величины P_1 , скорость пропитывания скачкообразно уменьшается.

На (рис. 3) приведены зависимости коэффициента пропитывания от давления в полулогарифмических координатах при использовании в качестве рабочей жидкости диоксилсебацината. Аналогичные зависимости получены для системы эпоксидное связующее-углеродное волокно (рис. 4).

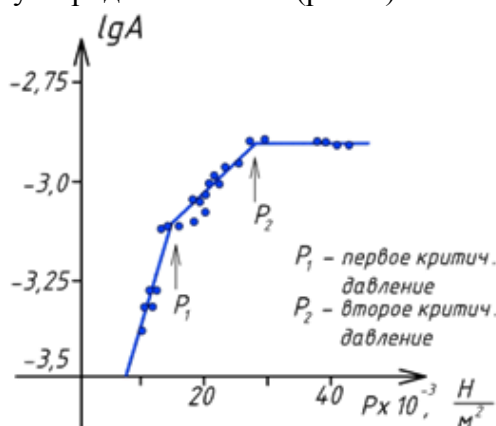


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропитывания от давления для системы углеродное волокно AS-4 - диоксилсебацинат

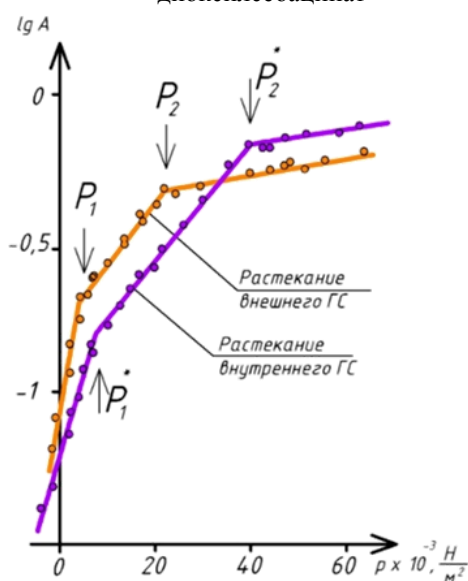


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропитывания от давления для системы углеродное волокно AS-4 – эпоксидное связующее ЭНФБ

Как видно из полученных данных, повышение давления выше P_2 , не эффективно, поскольку оно не влияет на кинетику процесса. Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено, что при динамическом смачивании углеродного волокна простой жидкостью, например, ди-

октилсебацинатором, образуется один граничный слой, а при смачивании их связующим, образуются два граничных слоя. На рис. 3 показаны критические давления P_1 и P_2 , относящиеся к растеканию внешнего, менее прочного граничного слоя и критические давления P_1^* и P_2^* , характеризующие растекание внутреннего, более прочного граничного слоя. Как следует из полученных данных, прочность внутренних граничных слоев, образованных эпоксидными связующими, в полтора – два раза прочнее внешних.

Из полученных данных следует, что для оптимальной скорости смачивания преформы эпоксидным связующим величина внешнего давления должна быть больше P_2^* , при котором граничные слои (и внешний и внутренний) разрушаются. Установлено, что для эпоксидного связующего при степени наполнения 55-60 об.% волокон граничные слои разрушаются при давлениях $(100 \div 450) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$.

Далее, на этом же стенде в работе были исследованы зависимости скорости течения связующего в зависимости от давления, что позволило определить значение пределов текучести граничных слоев. Экспериментально установлено, что прочность граничных слоев зависит от содержания волокон и чем оно выше, тем больше значение пределов текучести. При содержании волокна 40%, толщина первого граничного слоя для системы углеродное волокно AS-4-эпоксидное связующее ЭНФБ составила 0,72 мкм, толщина второго – 1,08 мкм. При изменении системы, например, при замене связующего или углеродного волокна происходит изменение толщин граничных слоев и значений их пределов текучести.

Выводы

Использование специального стенда позволило исследовать кинетику процессов течения связующего по волокну в режиме реального времени. Данный стенд позволяет проводить исследования в режимах смачивания (связующее течет по сухому волокну) и растекания (связующее течет по пропитанному волокну).

В результате проведенных исследований установлено, что в процессе течения имеет место образование граничных слоев. В системе углеродное волокно-диоксилсебацинат имеет место образование одного граничного слоя, в системе углеродное волокно-эпоксидное связующее происходит образование двух граничных слоев. Прочность внутренних граничных слоев нарастает по мере увеличения степени наполнения.

В работе экспериментально определены значения давлений, при которых будет происходить разрушения внутреннего и внешнего граничных слоев. Установлено, что для эпоксидного связующего при степени наполнения 55-60 об.% волокон граничные слои разрушаются при давлениях $(100\div 450) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$.

Список литературы

1. Нелюб В.А. Оценка адегзионного взаимодействия между углеродным волокном и эпоксидным связующим // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С.20-22.
2. Баурова Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин. Учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин // Москва. МАДИ. – 2016. – 264 с.
3. Нелюб В.А., Гращенко Д.В., Коган И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // Химическая технология. 2012. Т.13. №12. С.735-739.
4. Баурова Н.И. Учет факторов технологической наследственности методами технологической механики / Н.И. Баурова, В.А. Зорин, В.М. Приходько // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. - №6. – С. 2-8.
5. Баурова Н.И. Проявление синергетического эффекта в технологической наследственности / Н.И. Баурова, В.А. Зорин, В.М. Приходько // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – №10. – С.3-7.
6. Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В. Исследование механизма структурообразования связующего в зависимости от микрорельефа поверхности углеродного волокна // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №2. С.19-23.
7. Горбунова И. Ю., Кербер М. Л., Казаков С. И. и др. Влияние термопластов различного химического строения на изменение вязкости в процессе отверждения эпоксиаминных связующих и клеев // Десятая Международная конференция по

химии и физикохимии олигомеров. Волгоград, 2009. С. 3-4.

8. Бородулин А. С. Пластификаторы для эпоксидных клеев и связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 7. С. 31.
9. Баженов С. Л., Берлин Л. Л., Кульков Л. Л., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы: Научное издание. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
10. Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 3 (15), с. 25
11. Комков М.А., Тарасов В.А., Зарубина О.В. Определение толщины композитного слоя сферической оболочки с учетом ширины наматываемой ленты. Известия вузов. Сер. Машиностроение, 2013, № 10, с. 20-29.
12. Горбаткина Ю. А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. М.: Химия, 1987. 191 с.
13. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб. Пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
14. Братухин А. Г. Погосян М. А., Суров В. И., Тарасенко Л. В. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения: Учебное пособие/Науч. ред. А. Г. Братухин. М.: Изд-во МАИ, 2007. С. 3-4.
15. Гузева Т. А. Новые подходы к повышению эффективности производства деталей из органо-пластиков//Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 7. С. 53-56.

References

1. Neliub V.A. Otsenka adegzionnogo vzaimodeistviia mezhd ugle rodny m voloknom i epoksidnym sviazuiushchim // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2014. №7. S.20-22.
2. Baurova N.I. Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin. Ucheb. posobie / N.I. Baurova, V.A. Zorin // Moskva. MADI. – 2016. – 264 s.
3. Neliub V.A., Grashchenkov D.V., Kogan I., Sokolov I.A. Primenenie priamykh metodov formovaniia pri proizvodstve krupnogabaritnykh detalей iz stekloplastikov // Khimicheskaiа tekhnologiya. 2012. T.13. №12. S.735-739.
4. Baurova N.I. Uchet faktorov tekhnologicheskoi nasledstvennosti metodami tekhnologicheskoi mekhaniki / N.I. Baurova, V.A. Zorin, V.M. Pri-khod'ko // Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. – 2016. - №6. – S. 2-8.
5. Baurova N.I. Proiavlenie sinergeticheskogo ef-fekta v tekhnologicheskoi nasledstvennosti / N.I. Baurova, V.A. Zorin, V.M. Prikhod'ko // Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. – 2015. – №10. – S.3-7.

6. Neliub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Issledovanie mekhanizma strukturnoobrazovaniia svyazuiushchego v zavisimosti ot mikrorel'efa poverkhnosti uglerodnogo volok-na // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2016. №2. S.19-23.
7. Gorbunova I. Iu., Kerber M. L., Kazakov S. I. i dr. Vliianie termoplastov razlichnogo khimiche-skogo stroeniia na izmenenie viazkosti v protsesse otverzhdeniia epoksiaminnykh svyazuiushchikh i kleev//Desiataia Mezhdunarodnaia konferentsiia po khimii i fizikokhimii oligomerov. Volgograd, 2009. S. 3-4.
8. Borodulin A. S. Plastifikatory dlia epoksid-nykh kleev i svyazuiushchikh // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2012. № 7. S. 31.
9. Bazhenov S. L., Berlin L. L., Kul'kov L. L., Oshmian V. G. Polimernye kompozitsionnye materialy: Nauchnoe izdanie. Dolgoprudnyi: Izd. Dom «Intel-ekt», 2010. 352 s.
10. Reznik S.V. Aktual'nye problemy proektirovaniia, proizvodstva i ispytaniia raketno-kosmicheskikh konstruksii. Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii, 2013, № 3 (15), s. 25
11. Komkov M.A., Tarasov V.A., Zarubina O.V. Opre- delenie tolshchiny kompozitnogo sloia sferiche-skoi obolochki s uchetom shiriny namatyvaemoi lenty. Izvestiia vuzov. Ser. Mashinostroenie, 2013, № 10, s. 20-29.
12. Gorbatkina Iu. A. Adgezionnaia prochnost' v si- stemakh polimer-volokno. M.: Khimiia, 1987. 191 s.
13. Komkov M. A., Tarasov V. A. Tekhnologiya namot- ki kompozitnykh konstruksii raket i sredstv po- razheniia: ucheb. Posobie. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2011. 431 s.
14. Bratukhin A. G. Pogosian M. A., Surov V. I., Tara- senko L. V. Konstruksionnye i funktsional'nye ma- terialy sovremennogo aviastroeniia: Ucheb-noe posobie/Nauch. red. A. G. Bratukhin. M.: Izd-vo MAI, 2007. S. 3-4.
15. Guzeva T. A. Novye podkhody k povysheniiu ef- fektivnosti proizvodstva detalei iz organo- plastikov//Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik. 2012. № 7. S. 53-56.

УДК 621.923:621.90.17

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ШЛИФОВАНИИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.М. Братан¹, А.Г. Колесов¹, С.И. Рощупкин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Рассмотрен процесс взаимодействия инструмента с заготовкой на микроуровне при комбинированном шлифовании токопроводящих хрупких материалов. Разработана комплексная теоретико-вероятностная математическая модель операции комбинированного шлифования токопроводящих хрупких материалов. Математическая модель позволяет рассчитывать полную вероятность удаления материала на любом уровне заготовки при наличии микрорезания-скалывания, хрупкого объемного разрушения и эрозионного удаления материала. Моделирование процесса комбинированного шлифования позволяет оптимизировать обработку и сокращать время подготовки эффективных циклов обработки на автоматизированном оборудовании.

Ключевые слова: комбинированное шлифование, вероятность удаления, микрорезание, эрозионное удаление материала, математическая модель.

IDENTIFICATION OF REMOVAL PARAMETERS OF COMBINED GRINDING THE CONDUCTIVE BRITTLE MATERIALS

S.M. Bratan¹, A.G. Kolesov¹, S.I. Roshchupkin¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The process of interaction between the tool and the workpiece at the micro level is considered in the case of combined grinding of current-carrying brittle materials. A complex theoretic-probabilistic mathematical model of the operation of combined grinding of current-carrying brittle materials has been developed. The mathematical model allows to calculate the full probability of material removal at any level of the workpiece in the presence of microcutting-chipping, brittle volumetric fracture and erosive material removal. Simulation of the combined grinding process allows to optimize the processing and shorten the preparation time of efficient processing cycles on automated equipment.

Keywords: combined grinding, probability of removal, microcutting, erosive material removal, mathematical model.

Введение

При финишной обработке токопроводящих хрупких материалов, например, специализированной керамики и токопроводящих керамических покрытий применяются комбинированные методы шлифования, при которых съем материала осуществляется за счет комбинации процессов микрорезания-скалывания, хрупкого объемного разрушения и эрозионного удаления материала [1-3].

Автоматизация таких процессов в современных условиях возможна при наличии рациональных циклов управления операцией. Их разработка эмпирическим путем не

позволяет широко внедрить процессы комбинированного шлифования из-за большого объема предварительных исследований[4].

Создание математической модели процесса обработки дает возможность автоматизировать проектирование финишной операции и оптимизировать ее по требуемому критерию.

Целью данной статьи разработка комплексной теоретико-вероятностной математической модели операции комбинированного шлифования токопроводящих хрупких материалов.

Разработка математической модели процесса комбинированного шлифования

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съём материала при наличии микрорезания-скалывания, хрупкого объемного разрушения и эрозионного удаления материала, рассмотрен процесс взаимодействия инструмента с заготовкой на микроуровне. Алмазные зерна расположены в объеме шлифовального круга хаотично, поэтому процесс их взаимодействия с обрабатываемым материалом носит случайный характер [5].

Удаление материала в результате работы эрозии и абразива является случайным процессом, охарактеризовать который можно полной вероятностью удаления материала. Для любой точки поверхности заготовки можно рассматривать случайное событие, состоящее в совместном не удалении этой точки эрозионным воздействием, микрорезанием-скалыванием и хрупким объемным разрушением, тогда общая вероятность не удаления определяется:

$$P(\overline{M}) = P_1(\overline{M}) \cdot P_2(\overline{M}) \cdot P_3(\overline{M}),$$

где $P_1(\overline{M})$ – вероятность того, что материал не удален за счет микрорезания; $P_2(\overline{M})$ – вероятность того, что материал не удален за счет объемного хрупкого разрушения, $P_3(\overline{M})$ – вероятность эрозионного неразрушения материала.

Вероятность не удаления материала в момент времени τ за счет микрорезания определяется зависимостью [5]

$$P_1(\overline{M}) = \exp \left[-a_0 - \int_{t_0}^t a_{1i}(y, \tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где y – расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня. Показатель a_1 для каждого прохода определяется выражением

$$\Delta a_1(y, \tau) = \kappa_c b_z(y, \tau) \Delta \lambda,$$

где κ_c – коэффициент стружкообразования; $b_z(y)$ – ширина зерна на уровне y ; $\lambda \Delta$ – число алмазных зерен, прошедших через единичное сечение.

Для условий, когда шлифуются хрупкие материалы (различные виды керамики), $\kappa_c = 1$ [6]. В процессе шлифования определенное количество зерен осуществляет микрорезание поверхности заготовки, а другая часть зерен непосредственно скалывает материал. Поэтому при расчете показателя a_1 , необходимо учитывать только те зерна, которые могут срезать материал, т.е. из общего числа зерен нужно вычесть зерна, производящие скалывание.

Тогда

$$\Delta a_1(y, \tau) = b_z(y, \tau) \Delta \lambda (1 - P_{ck}) \quad (2)$$

где P_{ck} – вероятность объемного хрупкого разрушения материала заготовки при взаимодействии с зерном инструмента.

При аппроксимации профиля зерна степенной зависимостью (в простейшем случае параболоидом вращения) получаем

$$b_z(y, \tau) = C_b (t_\phi - y - u)^m,$$

где C_b , m – коэффициенты формы зерна;

t_ϕ – фактическая глубина микрорезания;

u – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины зерна.

Через единичное сечение $1 \cdot \Delta u$ за время $\Delta \tau$ проходит $\Delta \lambda$ зерен инструмента

$$\Delta \lambda = V_\kappa n_z f(u) du d\tau, \quad (3)$$

где n_z – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента; V_κ – скорость подачи инструмента.

В свою очередь функция распределения количества рабочих зерен инструмента по координате u может быть аппроксимирована зависимостью [2]

$$f(u) = \frac{\chi}{H_u^\chi} u^{\chi-1},$$

где H_u – величина слоя рабочей поверхности круга, в пределах которой подсчитывается n_z .

После подстановки (3) в (2) получим:

$$a_1(y, \tau) = n_z V_\kappa \kappa_c \int_{t_0}^{t_\phi - y} \int_0^{t_\phi - y} b_z f(u) (1 - P_{ck}) du d\tau. \quad (4)$$

Вероятность скалывания P_{ck} определяется режимом шлифования и расположения

зерна в объеме инструмента. Для ее расчета могут быть использованы зависимости А.В. Королева [7], полученные при анализе процесса правки абразивного инструмента и позволяющие определить вероятность объемного разрушения зерен шлифовального круга. Процесс правки абразивных кругов в определенном смысле подобен процессу алмазного шлифования. Однако данные зависимости сложны для практического использования. Поэтому желательно заменить их приближенными так, чтобы стало возможным аналитическое вычисление интеграла (4). В этом качестве может быть использована зависимость [8]:

$$P_{ск} = P_0 \left[1 - \left(\frac{u}{t_\phi} \right)^\beta \right]. \quad (5)$$

Для уровня $u=0$ и $P_{ск} = P_0$, где P_0 определяется режимами шлифования и характеристикой инструмента. Для уровня $u=t_\phi$ (наружная поверхность заготовки) $P_{ск} = 0$. Коэффициенты P_0 и β для конкретных условий шлифования могут быть рассчитаны по зависимостям [1]. Для этого достаточно рассчитать только два значения $P_{ск}$ и u . Подставив (5) в (4), получим:

$$a_1(y, \tau) = n_3 V_k \kappa_c \int_{t_0}^t \int_0^{t_\phi - y} C_b (t_\phi - y - u)^m \frac{\chi}{H_u^\chi} u^{\chi-1} \cdot \left[1 - P_0 + P_0 \left(\frac{u}{t_\phi} \right)^\beta \right] du d\tau. \quad (6)$$

Интеграл (6) вычислим при $\tau = t_0$:

$$\begin{aligned} a_1(y, \tau) &= n_3 V_k \kappa_c \int_{t_0}^t \int_0^{t_\phi - y} \frac{C_b (t_\phi - y - u)^m \chi u^{\chi-1}}{H_u^\chi} (1 - P_0) du d\tau + \\ &+ n_3 V_k \kappa_c \int_{t_0}^t \int_0^{t_\phi - y} \frac{C_b (t_\phi - y - u) \chi u^{\chi-1}}{H_u^\chi} P_0 \left(\frac{u}{t_\phi} \right)^\beta du d\tau = \\ &= \frac{C_b n_3 V_k \kappa_c \Gamma(m+1) \Gamma(\chi) (t-t_0) (t_\phi - t_0)^{m+\chi}}{H_u^\chi \Gamma(m+\chi+1) (m+\chi+1)} (1 - P_0) + \\ &+ \frac{C_b n_3 V_k \kappa_c \Gamma(m+1) \Gamma(\chi+\beta) (t-t_0) (t_\phi - t_0)^{m+\chi+\beta}}{t_\phi^\beta H_u^\chi \Gamma(m+\chi+\beta) (m+\chi+\beta+1)} P_0. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом обозначений

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Gamma(m+1) \Gamma(\chi)}{\Gamma(m+\chi+1) (m+\chi+1)} (1 - P_0); \\ B &= \frac{\Gamma(m+1) \Gamma(\chi+\beta)}{\Gamma(m+\chi+\beta+1) (m+\chi+\beta+1)} P_0; \\ C &= \frac{C_b n_3 V_k \kappa_c}{H_u^\chi}; \end{aligned}$$

выражение (7) примет вид:

$$\begin{aligned} a(y, \tau) &= CA(t-t_0)(t_\phi - y)^{m+\chi} \cdot \\ &\cdot (1 - P_0) + \frac{CB}{t_\phi^\beta} (t-t_0)(t_\phi - y)^{m+\chi+\beta} P_0 = \\ &= C(t-t_0)(t_\phi - y)^{m+\chi} \left[A + \frac{B}{t_\phi^\beta} (t_\phi - y)^\beta \right]. \end{aligned}$$

Через каждый промежуток времени $\Delta\tau$ значение y изменяется на величину съема Δh

$$\begin{aligned} y(\tau_1) &= y + \Delta h \\ y(\tau_2) &= y + 2\Delta h \text{ и т.д.} \\ y(\tau_3) &= y + 3\Delta h \end{aligned}$$

Отсюда с учетом (1) получено

$$P_1(\bar{M}) = \exp \left(- \int_{t_0}^t C(t-t_0)(t_\phi - y - \tau \Delta h)^{m+\chi} \cdot \left(A + \frac{B}{t_\phi^\beta} (t_\phi - y - \tau \Delta h)^\beta \right) d\tau \right), \quad (8)$$

где τ – текущее время.

После интегрирования по τ , выражение (8) примет вид

$$P_1(\overline{M}) = \exp \left(-G_1 \frac{(t_\phi - y - t\Delta h)^{m_1} - (t_\phi - y - t_0\Delta h)^{m_1}}{(t_\phi - y)m_1} + L_1 \frac{(t_\phi - y - t\Delta h)^{m_2} - (t_\phi - y - t_0\Delta h)^{m_2}}{(t_\phi - y)m_2} \right), \quad (9)$$

где $G_1 = CA; L_1 = CB, \quad m_1 = m + \chi + 1, \quad m_2 = m + \chi + \beta + 1.$

Вероятность не удаления материала за счет объемного хрупкого разрушения запишется как:

$$P_2(\overline{M}) = \exp \left(-a_0 - \int_{t_0}^t a_2(y, \tau) d\tau \right).$$

Для рассматриваемого случая ширина единичной риски b_x , как результат взаимодействия зерна инструмента с деталью из керамики, больше его фактической ширины b_3 .

Для аппроксимации b_x используется степенная зависимость:

$$b_x(y, \tau) = C_{bx}(t_\phi - y - u + \Delta h_x)^{m_x},$$

где Δh_x – величина приращения съема материала в процессе хрупкого разрушения керамики.

В данном случае показатель степени a_2 равен

$$\Delta a_2(y, \tau) = b_x(y, \tau) \Delta \lambda P_{ck}.$$

Преобразования аналогичные выводу зависимости для $a_1(y)$, приведут к зависимости

$$P_2(\overline{M}) = \exp \left[-a_0 - \int_{t_0}^t c(t - t_0)(t_\phi + \Delta h_x - y - \tau \Delta h)^{m+\chi} \cdot \left(A_2 + \frac{B}{t_\phi^\beta} (t_\phi + \Delta h_x - y - \tau \Delta h)^\beta \right) d\tau \right], \quad (10)$$

$$\text{где } A_2 = \frac{\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)}{\Gamma(m+\chi+1)(m+\chi+1)} P_0.$$

После интегрирования по τ , выражение (10) примет вид

$$P_2(\overline{M}) = \exp \left(-G_2 \frac{(t_\phi - y + \Delta h_x - t\Delta h)^{m_1} - (t_\phi - y + \Delta h_x - t_0\Delta h)^{m_1}}{(t_\phi - y)m_1} + L_1 \frac{(t_\phi - y + \Delta h_x - t\Delta h)^{m_2} - (t_\phi - y + \Delta h_x - t_0\Delta h)^{m_2}}{t_\phi^\beta (t_\phi - y)m_2} \right),$$

где $G_2 = CA_2$.

Для описания вероятности эрозионного разрушения рассмотрим процессы, протекающие при наличии эрозионных разрядов в зоне обработки[9-12].

На поверхности заготовки могут образовываться следы от эрозионных разрядов (рис.1)

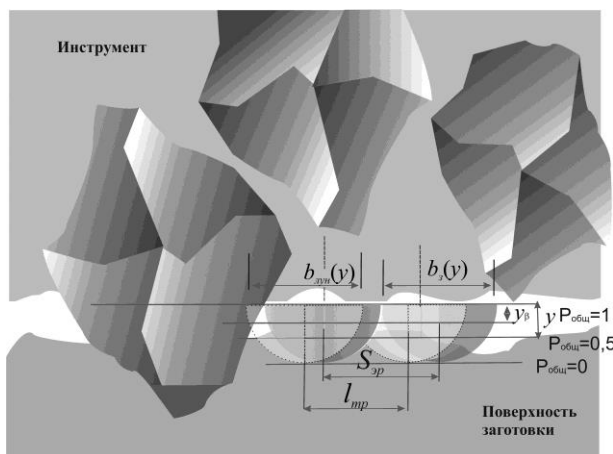


Рис.1. Расчетная схема

Если две соседние лунки перекрывают друг друга, то материал между ними будет удален полностью. Это условие для любого уровня y можно записать:

$$0 < S_{эп} \leq 0.5[b_{эп1}(y) + b_{эп2}(y)],$$

где $S_{эп}$ - расстояние между двумя соседними лунками на поверхности в рассматриваемом

сечении, $b_{эп1}(y), b_{эп2}(y)$ - ширина двух соседних лунок на уровне y .

Если ширина лунок на уровне y равна, то условие удаления материала можно переписать следующим образом:

$$0 < S_{эп} \leq b_{эп}(y).$$

Очевидно, что вероятность эрозионного удаления заготовки $P_3(y)$ на уровне y будет равна вероятности попадания случайной величины $S_{эп}$ на отрезок от 0 до $b_{эп}(y)$. Если плотность распределения вероятности непрерывной величины $S_{эп}$ обозначить через $f(S_{эп})$, то вероятность удаления материала $P_3(y)$:

$$P_3(y) = P(0 < S_{эп} \leq b_{эп}(y)) = \int_0^{b_{эп}(y)} f(S_{эп}) dS_{эп}.$$

Рассматривая возникновение разрядов в одном сечении заготовки при прохождении единичного участка круга, можно отметить, что вероятность возникновения того или иного количества разрядов зависит только от длины участка сечения. Лунки не могут попасть одна в другую и не могут находиться сколь угодно близко одна к другой, т. к. имеют определенный диаметр канала разряда. Поэтому появление на поверхности заготовки лунок с расстоянием $S_{эп}$ после прохождения единичного участка круга можно рассматривать, как стационарный ординарный поток с ограниченным последствием [11]. Поскольку через каждое сечение заготовки проходит большое количество единичных поверхностей инструмента, то результирующий за проход инструмента поток событий $S_{эп}$ в рассматриваемом сечении, является суммой большого числа стационарных, ординарных потоков с ограниченным последствием. Из теории массового обслуживания следует, что поток $S_{эп}$ можно считать сколь угодно близким к простейшему, а плотность распределения [13-15]

$$f(S_{эп}) = \lambda \cdot e^{-\lambda S_{эп}}.$$

Тогда получим выражение для вероятности удаления материала:

$$P_3(y) = \int_0^{b_{эп}(y)} \lambda_{лун} \cdot e^{-\lambda_{лун} S_{эп}} dS_{эп} = 1 - e^{-\lambda_{лун} b_{эп}(y)} = 1 - e^{-a_3(y)},$$

где $\lambda_{лун}$ - среднее количество лунок на единицу длины сечения заготовки.

Таким образом, вероятность эрозионного удаления материала на любом из рассматриваемых уровней y определяется шириной

образующих лунок и их количеством на единицу длины сечения:

$$a_3(y) = \lambda_{лун} b_{эп}(y). \quad (11)$$

Форму лунок обычно моделируют шарообразным сегментом с диаметром на поверхности — $d_{л}$ и глубиной — $h_{л}$. Поверхность, на которой возникают лунки постоянно смещается вглубь заготовки, потому что материал заготовки удаляется. Ширину лунок $b_{эп}$ на уровне $y - y_{\beta}$ от поверхности возникновения разряда (рис. 1) определим из геометрического анализа шарового сегмента:

$$\left. \begin{aligned} b_{эп}(y) &= 0, & \text{при } y_{\beta} > y > y_{\beta} + h_{л} \\ b_{эп}(y) &= R \sqrt{h_{л} - y_{эп}}, & \text{при } y_{\beta} \leq y \leq y_{\beta} + h_{л} \end{aligned} \right\},$$

где R — показатель, определяющий величину диаметра лунок.

Так как эрозионные разряды возникают в местах формирования сколотых частиц материала (стружек), а доля случайно возникающих разрядов в общем объеме незначительна и ей можно пренебречь, то количество возникающих лунок напрямую зависит от числа режущих зерен и от строения инструмента.

Для определения вероятности эрозионного разрушения заготовки при шлифовании периферией круга рассмотрим сечение детали в зоне контакта.

За время $\Delta\tau$ сечение заготовки смещается на расстояние Δz и через него проходит участок круга с длиной дуги $(V_{\kappa} \pm V_u) \Delta\tau$, где V_{κ} — окружная скорость круга, V_u — скорость заготовки. Из общего числа режущих элементов на поверхности инструмента стружки могут образовывать зерна, вершины которых расположены в слое круга по высоте $u \leq t_{\phi} - y_{\beta}$, где t_{ϕ} — фактическая глубина резания.

Число стружек $\Delta\lambda$, сформированных элементарным слоем инструмента, вычисляется по плотности распределения зерен $f_3(u)$ [5], возникшие стружки создают высокую местную напряженность электрического поля и тем самым вызывают появление эрозионного разряда. Однако исследования показывают, что не все стружки способны вызвать пробой межэлектродного промежутка.

Это связано с тем, что между двумя разрядами в одной точке пространства необходимо наличие паузы длительностью τ_n для деионизации промежутка. Длительность необходимой паузы определяется средой, заполняющей МЭП.

Таким образом, количество разрядов, возникающих в зоне контакта от действия элементарной поверхности инструмента, определим:

$$\Delta N_{\text{эп}} = K_{\text{эп}} \Delta \lambda,$$

где $K_{\text{эп}}$ – коэффициент, учитывающий количество стружек, не вызывающих разряд.

Изменение параметра $a_3(y, \tau)$ определим, как приращение суммы поперечных размеров лунок (11):

$$\begin{aligned} \Delta a_3(y, \tau) &= k_c b_{\text{эп}}(y) \Delta N_{\text{эп}} = \\ &= k_c b_{\text{эп}}(y) n_3 f_3(u) \Delta u (V_k \pm V_u) \Delta \tau. \end{aligned}$$

Заменив τ на $\frac{z}{V_u}$, вычислим значение показателя $a_{\text{эп}}(y, \tau)$ в точке z зоны контакта.

$$\begin{aligned} a_3(y, \tau) &= R k_c \frac{(V_k \pm V_u)}{V_u} n_3 \cdot \\ &\cdot \int_0^{t_{\phi}-y_{\beta}} \int_{-L}^z f_3(u) \sqrt{(h_n - y + y_{\beta})} du dz \end{aligned}, \quad (12)$$

где L – половина длины зоны контакта, z – координата по длине зоны контакта.

Выражение (12) представляет обобщенную зависимость для определения вероятности эрозионного удаления материала заготовки.

Подставляя значения для глубины эрозионной лунки h_n и функцию распределения зерен по высоте $f_3(u)$ получим возможность рассчитать полную вероятность удаления материала $P_{\Sigma}(y, z)$ последовательно на всех уровнях заготовки:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(y, z) &= 1 - \bar{P}_1(y, z) \bar{P}_2(y, z) \bar{P}_3(y, z) = \\ &= 1 - \exp[-a_0(y, z) - a_1(y, z) - a_2(y, z) - a_3(y, z)] \end{aligned}$$

Общий слой удаленного материала y_{β} можно формально записать:

$$y_{\beta} = \int_0^{t_{\phi}} 1(P_{\Sigma}(y, z) - \beta_m) dy,$$

где $1(P_{\Sigma}(y, z) - \beta_m)$ – единичная функция, которая при достижении $P_{\Sigma}(y, z)$ величины β_m принимает значение, равное единице; β_m – принятый уровень доверительной вероятности, обычно равен 0,95.

Выводы

Рассмотренный подход к моделированию процесса комбинированного шлифования позволяет оптимизировать обработку и сокращать время подготовки эффективных циклов обработки на автоматизированном оборудовании.

Список литературы

1. Масловский А.А. Абразивно-алмазная обработка и доводочные процессы / справочник; под ред. А.А. Масловского – М.: Машиностроение, 1986. – 196 с.
2. Козлов А.М. Моделирование совмещенной абразивной обработки / А.М.Козлов Д.В., Болгов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. № 2. – С. 50-53
3. Гусев В.В., Калафатова, Л.П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк: ГВУЗ “ДонНТУ”, 2012. – 250с.
4. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 182 с.
5. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 с.
6. Гусев В.В. Научные основы технического обеспечения эксплуатационных характеристик изделий из технической керамики при алмазном шлифовании: автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.В. Гусев. – Донецк, 2006. – 30 с.
7. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. / Королев А.В., Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1987. – 160 с
8. Новоселов Ю.К. Влияние случайной составляющей отклонений профиля инструмента на динамику процесса круглого наружного шлифования / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, В.Б. Богущкий// Научные исследования в машиностроении: журнал. – Брянск 2016. – Вып. 5(59). – С. 10-16
9. Артамонов Б.А., Вишняцкий А.А., Волков Ю.С., Глазков А.В. Размерная электрическая обработка

металлов / Б.А. Артамонов, А.А. Вишникпий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков. – М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.

10. Братан С.М. Вероятностный подход при имитационном моделировании электроэрозионного шлифования / С.М. Братан // Вестник СевГТУ: сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь, 1997. – Вып. 7. – С. 140-144.
11. Евсеев Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов: изд-во Саратовск. ун-та, 1975. – 127 с.
12. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов, 1975. – 189 с
13. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. - 432 с.
14. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
15. Боровков, А.А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1972. - 368 с.

References

1. Maslovskiy A.A. Abrazivno-almaznaya obrabotka i dovodochnyye protsessy / spravochnik; pod red. Maslovskogo A.A. – М.: Mashinostroyeniye, 1986. – 196 s.
2. Kozlov A.M. Modelirovaniye sovme-shchennoy abrazivnoy obrabotki / A.M.Kozlov D.V., Bolgov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2010. № 2. S. 50-53
3. Gusev V.V., Kalafatova, L.P. Tekhno-logicheskoye obespecheniye kachestva obrabotki izdeliy iz tekhnicheskoy keramiki Donetsk: GVUZ "DonNTU", 2012. – 250s.
4. Yakimov A.V. Upravleniye protsessom shlifovaniya / A.V. Yakimov [i dr.]. – Kiyev: Tekhnika, 1983. – 182 s.
5. Novoselov YU.K. Dinamika formoob-razovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy ob-rabotke / YU.K.

Novoselov. – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317

6. Gusev V.V. Nauchnyye osnovy tekhnicheskoy obespecheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy iz tekhnicheskoy keramiki pri almaznom shlifovanii: avtoref. dis. na soiskaniye nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroye-niya» / V.V. Gusev. – Donetsk, 2006. – 30 s.
7. Korolev A.V. Teoretiko-veroyatnostnyye osnovy abrazivnoy obrabotki. Chast' 1. Sostoyaniye rabochey poverkhnosti abrazivnogo instrumenta./ Korolev A.V., YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta, 1987. – 160 s
8. Novoselov YU.K. Vliyaniye sluchaynoy sostavlyayushchey otkloneniy profilya instru-menta na dinamiku protsessa kruglogo na-ruzhnogo shlifovaniya / YU.K. Novoselov, S.M. Bratan, V.B Bogutskiy// Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii: zhurnal. – Bryansk 2016. –Vyp. 5(59). – S. 10-16
9. Artamonov B.A., Vishnipkiy A.A., Volkov YU.S., Glazkov A.V. Razmernaya elek-tricheskaya obrabotka metallov / B.A. Arta-monov, A.A. Vish-nipkiy, YU.S. Volkov, A.V Glazkov. – М.: Vysshaya shkola, 1978. – 336 s.
10. Bratan S.M. Veroyatnostnyy podkhod pri imitatsionnom modelirovanii elektro-erozionnogo shlifovaniya / S.M. Bratan // Vestnik SevGTU: ser. Avtomatizatsiya pro-tsessov i upravleniye: sb. nauch. tr. – Seva-stopol', 1997. – Vyp. 7. – S. 140-144.
11. Yevseyev D. G. Formirovaniye svoystv poverkhnostnykh sloeyev pri abrazivnoy obra-botke / D. G. Yevseyev. – Saratov: izd-vo Sara-tovsk. un-ta, 1975. – 127 s.
12. Korolev A.V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / A.V. Ko-rolev. – Saratov, 1975. – 189 s
13. Kleynrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya / L. Kleynrok. – М.: Mashinostroyeniye, 1979. - 432 s.
14. Venttsel' Ye.S. Teoriya sluchaynykh protsessov i yeye inzhenernyye prilozheniya / Ye.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – М.: Nauka, 1991. - 384 s.
15. Borovkov A.A. Veroyatnostnyye protsessy v teorii massovogo obsluzhivaniya / A.A. Borovkov. – М.: Nauka, 1972. - 368 s.

УДК 621.923

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

С.М. Братан¹, А.Г. Колесов¹, Т.В. Стадник¹, С.И. Рощупкин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В данной статье представлена стратегия управления процессами ленточного шлифования в автоматизированном производстве. На процесс шлифования оказывает влияние большое количество изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий, которые приводят к изменению параметров состояния во всех звеньях системы и выходных параметров на заключительном этапе выполнения операции. Представленная схема оптимального управления операцией шлифования включает процедуру оценки состояния технологической системы (до обработки), оценки состояния технологической системы (в процессе обработки), восстановления состояния технологической системы и этап стабилизации номинального цикла шлифования. Управление операцией возможно за счет совместного решения задач оптимального оценивания состояния и регулирования, которые включаются в единый процесс.

Ключевые слова: ленточное шлифование, абразивная лента, входные и выходные параметры, стратегия управления.

THE STRATEGY OF CONTROL PROCESSES OF BELT GRINDING IN AUTOMATED PRODUCTION

S.M. Bratan¹, A.G. Kolesov¹, T.V. Stadnik¹, S.I. Roshchupkin¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

This article presents a strategy of control on operation of belt grinding processes in automated production. On the grinding process is influenced by a large number of changing input, control and disturbing actions, which lead to change of the status parameters at all levels of system and output parameters in the final stage of the operation. Presents scheme of optimal control of the grinding operation includes the procedure for assessing the state of the technological system (before processing), assessing the state of the technological system (during processing), restoring the state of the technological system, and stabilizing the nominal grinding cycle. The control operation is possible due to the joint solution of problems of optimal state estimation and regulation, which are included in a single process.

Keywords: belt grinding, abrasive belt, input and output parameters, control strategy.

Введение

В настоящее время ленточное шлифование широко применяется в ведущих отраслях народного хозяйства. Шлифование абразивной лентой широко применяется в авиа-, автомобиле- и судостроении, в подшипниковой, деревообрабатывающей промышленности и других отраслях народного хозяйства на всех стадиях технологического процесса изготовления деталей: при черновой обработке со снятием значительных припусков, при чистовой и отделочной обработке заго-

товок с обеспечением малой шероховатости, требуемой степени точности и качества обработанной поверхности [1-10].

Повышение эффективности операции ленточного шлифования возможно за счет управления процессом обработки на автоматическом оборудовании. Методика построения управления требует наличия математической модели, которая позволяла бы с достаточной точностью описывать поведение технологической системы в реальном масштабе времени.

На процесс шлифования оказывает влияние большое количество изменяющихся

входных, управляющих и возмущающих воздействий. Поэтому для построения математической модели необходимо провести оценку технологического процесса как системы.

Операция шлифования, являясь частью технологического процесса, включает совокупность элементарных целенаправленных действий, связанных между собой структурно.

Она может быть разбита по функциональным признакам на подсистемы. Одна из возможных схем операции как динамической системы рассматривается на (рис.1.) Каждая из подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, их поведение может быть представлено в виде функционала, характеризующего состояние технологической системы:

$$\begin{aligned} Z(\tau) &= F[Z(\tau - \Delta\tau), X^n(\tau)] = \\ &= F[Z(\tau - \Delta\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)] \end{aligned} \quad (1)$$

где $X^n(\tau)$ - вектор входных сигналов системы; $Z(\tau)$ - вектор параметров состояния системы; F - закон отображения; $w^n(\tau)$ - вектор возмущающих воздействий; $u^n(\tau)$ - вектор управляющих воздействий; $x^n(\tau)$ - вектор входных параметров.

Запишем наблюдаемые параметры в виде преобразования:

$$\begin{aligned} Y(\tau) &= \Phi[Z(\tau), X^n(\tau)] = \\ &= \Phi[Z(\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)] \end{aligned} \quad (2)$$

где Y - вектор выходных параметров системы; Φ - закон отображения.

Большая часть исследований, выполненных в области шлифования, укладывается в рамки рассмотренных операторов преобразования. Все микропроцессы протекающие в технологической системе происходят одновременно, между ними существует ряд связей.

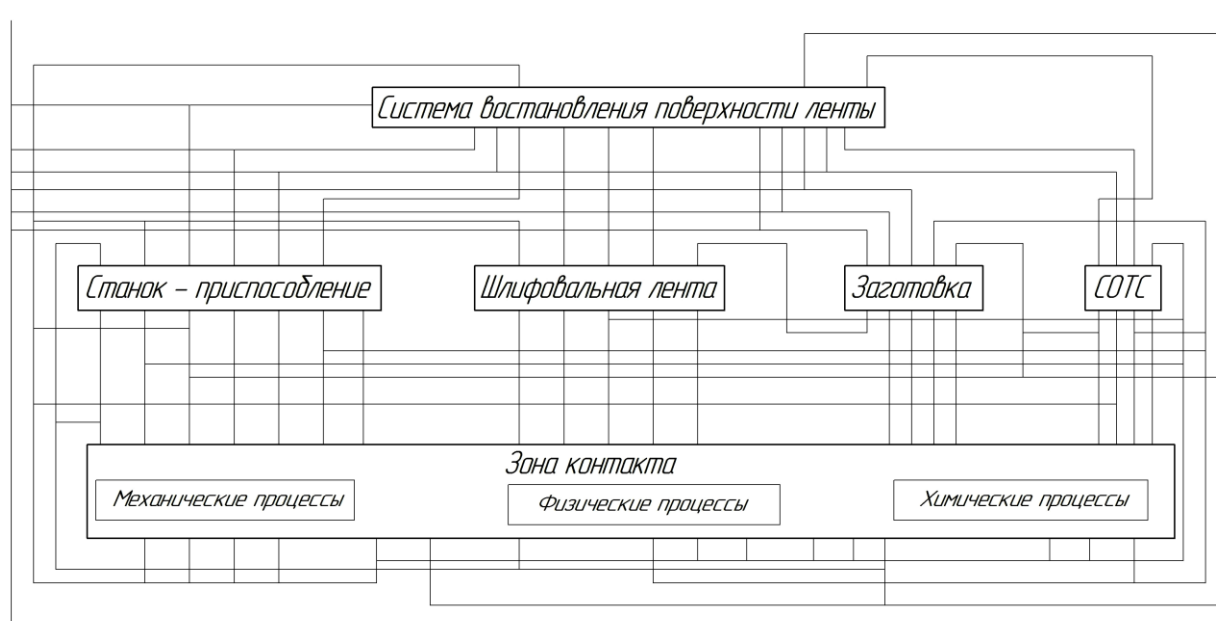


Рис. 1. Схема связей между подсистемами операции шлифования

Вышеуказанные преобразования определены для непрерывной системы. В случае шлифования на проход все параметры системы, кроме $w(\tau)$, изменяются периодически от прохода к проходу для показателей состояния детали. При рассмотрении параметров абразивной ленты можно учитывать

изменения от оборота к обороту. Это позволяет представить зависимости (1), (2) в дискретной форме:

$$\begin{aligned} Z_{i(j)} &= F[Z_{i-1(j-1)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}] \\ Y_{i(j)} &= \Phi[Z_{i(j)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ra_i &\leq Ra_{don} + \Pi_i, \\ Rmax_i &\leq Rmax_{don} + \Pi_i, \\ 0 &\leq u^n \leq u_{don}^n, \end{aligned} \quad (6)$$

где $t_{\phi i}$ – фактическая глубина резания на проходе; u_{don}^n – максимально допустимые значения управляющих воздействий, генерируемых оборудованием.

Критерием эффективности при шлифовании обычно принимают штучное время или приведенные затраты на шлифование изделия [15].

В общем случае, критерий эффективности J может быть выражен в виде функционала [11,14]:

$$\begin{aligned} J = f_1^0(y_0, u_1(t)) + f_2^0(y_1, u_2(t)) + \dots \\ + f_n^0(y_{n-1}, u_n(t)) + G_J = \end{aligned} \quad , \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^n y_n^0(y_{i-1}, u_i(t)) + G_J$$

где f_i^0 – функция критерия эффективности на i -ой операции; G_J – постоянные расходы, не зависящие от условий выполнения операции.

Результаты и обсуждение

В целом задача оптимизации технологического процесса шлифования может быть сформулирована следующим образом: зная начальное Y_0 и конечное Y_H , состояния, выбрать такое допустимое управление U типа (4), которое придает функционалу (7) минимальное значение. Данная задача является задачей теории оптимального управления. Для её решения необходимо определить функционалы (3), (4) и (7) в виде зависимостей от технологических факторов, определяющих процесс формообразования поверхности при шлифовании.

Из известных систем автоматического управления, при обработке изделий на операциях шлифования используются: разомкнутые системы; системы с обратной связью; адаптивные системы. По первой схеме работает 70% оборудования. При этом считается, что в процессе обработки каждой отдельной детали все параметры технологиче-

ского процесса неизменны и управление осуществляется по жестким циклам (номинальным траекториям в пространстве состояний технологической системы), однако в этом случае не учитывается влияние возмущающих факторов, которые трансформируют связи между параметрами технологической системы, в результате чего система обрабатывает алгоритм управления с существенными погрешностями.

По второй схеме работают до 28-29% шлифовальных станков, при этом, как правило, контролируется один из параметров технологической системы или одна из выходных переменных. Наиболее часто за такие параметры или переменные принимается размер обрабатываемой поверхности, одна из составляющих сил резания и т.д. При применении таких систем стремятся компенсировать влияние возмущающих воздействий, стабилизируя систему относительно номинальной траектории. Однако, существующие системы управления не позволяют проводить обработку изделий по оптимальным траекториям, так как осуществляют формирование управляющего сигнала по неполным данным с шумами измерений. Устранение этого недостатка возможно за счет оптимального оценивания состояния технологической системы, на основе которого может быть сформировано управление. В этом случае, необходимо аналитическое представление функционалов, характеризующих отклонения состояния технологической системы, т.е. сами отклонения должны быть представлены конкретными математическими выражениями.

Таким образом, при изменении вектора параметров состояния технологической системы, могут изменяться численные значения выходных переменных, а в общем случае, может измениться оператор, отражающий закон преобразования параметров объекта, это означает, что алгоритм изменения управляющих воздействий должен корректироваться для каждого j -го цикла работы системы или должны быть стабилизированы параметры технологической системы и алгоритм управления в наиболее благоприятной области.

Реализация такого управления возможна за счет применения систем с обратной связью, внедрение которых сдерживается отсутствием стратегии оптимального управления операций, предусматривающей непрерывную оценку состояния системы, с использованием методов теории оценивания и фильтрации при управлении объектами, которые до настоящего времени не применялись в теории шлифования. При этом возможно несколько вариантов: состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы можно пренебречь; состояние технологической системы известно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя; состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы можно пренебречь; состояние технологической системы неизвестно, изменениями параметров системы пренебречь нельзя.

Для рассматриваемых случаев схема оптимального управления (рис.2) включает процедуру оценки состояния технологической системы (до обработки), оценки состояния технологической системы (в процессе обработки), восстановления состояния технологической системы и этап стабилизации номинального цикла шлифования. Для таких процессов необходимо принимать решения и определять управление в реальном масштабе времени на основе измерений параметров объекта. В этом случае, управление операцией возможно за счет совместного решения задач оптимального оценивания состояния и регулирования, которые включаются в единый процесс.

При отсутствии вышеуказанных зависимостей в аналитической форме, решение задачи оптимизации технологического процесса возможно путем последовательного пошагового принятия решений по выбору управлений из состава допустимых, итерационным методом, с оценкой качества результата каждого шага (производства каждой отдельной детали) и пошаговым, целенаправленным изменением параметров процесса для получения деталей с наилучшим качеством.

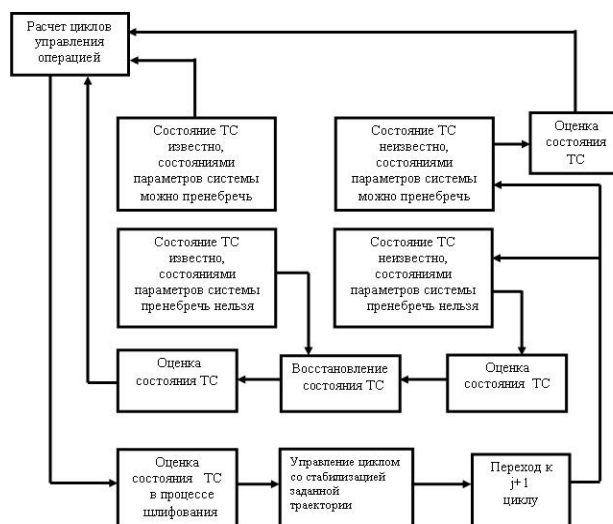


Рис. 2. Концептуальная схема оптимального управления операциями шлифования

Такая схема является схемой адаптивного управления, по ней работают только отдельные единицы шлифовальных станков, что связано с применением сложных алгоритмов обработки информации. Такие системы также не позволяют оптимально обрабатывать все изделия вследствие длительности этапа поиска оптимальных решений, процедура которого соизмерима со временем протекания процесса шлифования.

Выводы

Таким образом, для операции ленточного шлифования появляется три задачи управления оборудованием:

1. Известен критерий эффективности и математические зависимости, описывающие поведение процесса. Задача управления сводится к расчету номинальных траекторий, вдоль которых осуществляется движение объекта.

2. Известен критерий эффективности, есть математические зависимости, описывающие номинальные траектории, есть аналитическое представление функционалов, характеризующих отклонение состояний технологической системы, тогда задача управления сводится к стабилизации поведения объекта около номинальной траектории.

3. Известен критерий эффективности, отсутствует математическое описание процесса, задача управления сводится к пошаговому поиску оптимальных решений.

Список литературы

1. Bratan S. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 / S. Bratan, Yu. Novoselov, V. Bogutsky // Procedia Engineering, vol. 150 (2016), pp 809-814.
2. Шилиев С.А., Иванов А.Г. Анализ конструктивных и технологических параметров устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования на основе исследований динамики относительного движения абразивной ленты/ С.А. Шилиев, А.Г. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 6. С. 12– 20.
3. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
4. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. - Oxford: William Andrew, 2009. - 300p.
5. Шилиев С.А. Исследование технологических показателей процесса ротационного ленточного шлифования и получение математических зависимостей для количественного анализа условий резания. - Вестник ИжГТУ. -Ижевск: ИжГТУ, 2008. - №2 (38). - С. 23-26.
6. Вerezub V.N. Шлифование абразивными лентами. / В.Н. Вerezub. - М.: Машиностроение, 1972. - 104 с.
7. Паньков Л.А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов. / Л.А. Паньков, Н.В. Костин. - М.: Машиностроение, 1978. - 126 с.
8. Лурье Г.Б. Шлифование абразивными лентами. / Г.Б. Лурье. - М.: Высшая школа, 1980. -47 с.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: монография / Ю. К. Новоселов; [науч. ред. С. М. Братан]; М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины, Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь: [Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та], 2012. – 304 с.: ил. – Библиогр.: с. 286–301 (177 назв.).
10. Новоселов, Ю. К. Теоретико–вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / Ю. К. Новоселов, А.В. Королев – Из-во Саратов, ун-та, 1987. – 60 с.
11. Кузнецов, Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив – Севастополь: СевНТУ, 2010. –252с.
12. Хубка В. Теория технических систем / В. Хубка. – М.: Мир, 1987. – 208 с
13. Якобс Г.Ю. Оптимизация резания/ Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. -М.: Машиностроение, 1987. - 279 с.
14. В. Г. Болтянский Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
15. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175с.

References

1. Bratan S. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 / S. Bratan, Yu. Novoselov, V. Bogutsky // Procedia Engineering, vol. 150 (2016), pp 809-814.
2. Shiliaev S.A., Ivanov A.G. Analiz konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov ustroystva rotatsionnogo lentochnogo okhvatyvaiushchego shlifovaniia na osnove issledovaniia dinamiki otноситel'no-go dvizheniia abrazivnoi lenty/ С.А. Shiliaev, А.Г. Ivanov // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman. 2011. № 6. S. 12– 20.
3. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
4. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. - Oxford: William Andrew, 2009. - 300p.
5. Shiliaev S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh pokazatelei protsessa rotatsionnogo lentochnogo shlifovaniia i poluchenie matematicheskikh zavisimosti dlia kolichestvennogo analiza uslovii rezaniia. - Vestnik IzhGTU. -Izhevsk: IzhGTU, 2008. - №2 (38). - S. 23-26.
6. Verezub V.N. Shlifovanie abrazivnymi len-tami. / V.N. Verezub. - М.: Mashinostroenie, 1972. - 104 s.
7. Pan'kov L.A. Lentochnoe shlifovanie vysokoprochnykh materialov. / L.A. Pan'kov, N.V. Kostin. - М.: Mashinostroenie, 1978. - 126 s.
8. Lur'e G.B. Shlifovanie abrazivnymi lenta-mi. / G.B. Lur'e. - М.: Vysshiaia shkola, 1980.-47 s.
9. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnosti pri abrazivnoi obrabotke : monografiia / Iu. K. Novoselov ; [nauch. red. S. M. Bratan] ; M-vo obrazovaniia i nauki, molodezhi i sporta Ukrainy, Sevastop. nats. tekhn. un-t. – Sevastopol': [Izd-vo Sevastop. nats. tekhn. un-ta], 2012. – 304 s. : il. – Bibliogr.: s. 286–301 (177 nazv.).
10. Novoselov, Iu. K. Teoretiko–veroiatnostnye osnovy abrazivnoi obrabotki. Chast' 1. Sostoianie rabochei poverkhnosti instrumenta / Iu. K. Novoselov, A.V. Korolev – Iz-vo Sarat, un-ta, 1987. – 60 s.
11. Kuznetsov, Iu.N. Teopiia tekhnicheskikh sistem / Iu.N. Kuznetsov, Iu.K. Novoselov, I.V. Lutsiv – Seva-stopol': SevNTU, 2010. –252s.
12. Khubka V. Teoriia tekhnicheskikh sistem / V. Khubka. – М.: Mir, 1987. – 208 s
13. Iakobs G.Iu. Optimizatsiia rezaniia/ G.Iu. Iakobs, E. Iakob, D. Kokhan. -М.: Mashinostroenie, 1987. - 279 s.
14. V. G. Boltianskii Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniia / V. G. Boltianskii – 2-e izd., pererab. i dop. – М.: Nauka, 1969. – 408 s.
15. Iakimov A.V. Optimizatsiia protsessa shlifovaniia. – М.:Mashinostroenie, 1975. – 175s.

УДК 628.515:66.048.6

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ ПЕРЕГОНКИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

Д.О. Ерёмченко¹, Н.И. Покинтелица¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Приведены теоретические и экспериментальные исследования технологии компрессионной перегонки и показана возможность практического использования данной технологии с дополнительным источником тепла, снижающая расход энергии в 15 раз. Для проверки технической и экономической возможности внедрения компрессионной технологии перегонки был сделан сравнительный теоретический анализ теплового баланса перегонки обычным и компрессионным способами. Расход тепловой энергии на процесс системы «испаритель – компрессор вторичного пара – рекуператор» для нагрева воды до кипения, за счет полученного дистиллята, при потере в окружающую среду 6% (экспериментальная установка) составляет 31,4 кДж/кг или 1% от расхода тепла традиционной установки.

Ключевые слова: перегонка, сжатый вторичный пар, тепловой баланс, дополнительный источник тепла.

ENERGY-SAVING TECHNOLOGY VAPOR COMPRESSION DISTILLATION WITH AN ADDITIONAL SOURCE OF HEAT

D.O. Eremenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Theoretical and experimental researching of the compression distillation are given and proved the possibility of practical use of this technology with an additional source of heat, reducing energy consumption 15 times. To check the technical and economic possibilities of introducing compressional technology of distillation was made a comparative theoretical analysis of the heat balance of conventional distillation and compression methods. The heat consumption for the process of the system «evaporator – compressor secondary steam – heat exchanger» to heat the water to boiling, due to the resulting distillate, the loss to environment 6% (experimental unit) was 31.4 kJ/kg or 1% of the heat consumption of a traditional installation.

Keywords: distillation, the compressed secondary vapor, heat balance, additional source of heat.

Введение

Рост технического прогресса порождает новые проблемы, с которыми человечество не сталкивалось ранее. К ним относятся и проблема дефицита питьевой (пресной) воды, которая обостряется экологическим загрязнением ее источников. Природных механизмов самоочищения становится недостаточно для очистки различных выбросов производства и сточных вод. Одним из самых мощных природных механизмов очистки воды является её круговорот в природе. Вода под действием солнечной энергии испаряется, конденсируется в верхних слоях атмосферы, и виде атмосферных осадков

возвращается на землю. Но продольное загрязнение рек и грунтовых вод резко снижает эффект такой очистки [1].

Вместе с тем развитие энергетики и энергосберегающих технологий позволяют человечеству уже сейчас взять часть очищающих функций природы на себя. Известно, что получение пресной воды методом перегонки, по количеству солевого остатка не намного уступает природному, что позволило бы использовать пресную воду по “замкнутому циклу”.

Перегонка – процесс, включающий частичное испарение разделяемой смеси с по-

следующей конденсацией образующихся паров, осуществляемые однократно или многократно. В результате конденсации получают жидкости, состав которых отличается от состава исходной смеси. Разделение перегонкой основано на различной летучести компонентов смеси при одной и той же температуре [2].

В простейшем случае смеси являются бинарными. Получаемый при их перегонке пар содержит относительно большое количество наиболее летучего (низкокипящего) компонента (НKK), а неиспарившаяся жидкость обогащается труднолетучим (высококипящим) компонентом (ВKK) [3, 4].

Жидкость, образующаяся в результате конденсации паров, называется дистиллятом (ректификатом). А неиспарившаяся жидкая часть исходной смеси называется остатком.

Различают два вида перегонки – простая перегонка (дистилляция) и ректификация.

Простая перегонка – процесс однократного частичного испарения жидкой смеси и конденсации образующихся паров. Простая перегонка используется только для разделения смесей, летучести компонентов которой существенно различаются. Метод используется для предварительного (грубого) разделения смесей и для очистки сложных смесей от нежелательных компонентов. Для более четкого разделения используют ректификацию.

Ректификация – процесс многократного частичного испарения жидкости и конденсации паров. Процесс протекает путем контакта потоков жидкости и пара, имеющих различную температуру и осуществляется в аппаратах колонного типа. В результате такого контакта пары, покидающие аппарат, представляют собой практически чистый НKK, а остаток представляет собой практически чистый ВKK.

Простую перегонку проводят путем постепенного испарения жидкости, находящейся в т.н. перегонном кубе. Образующиеся при этом пары отводятся и конденсируются. Процесс может осуществляться периодически или непрерывно. При периодическом процессе с течением времени уменьшается количество остатка в кубе и меняется

состав дистиллята и остатка. В этой связи отбирают несколько фракций дистиллята, имеющие различный состав. Простая перегонка при этом называется фракционной или дробной.

Простую перегонку проводят при атмосферном давлении или под вакуумом. Вакуум позволяет снизить температуру кипения и используется для разделения термически нестойких смесей.

Перегонка с водяным паром используется также для понижения температуры кипения смеси. Если компоненты смеси не растворимы в воде, то ее используют в качестве дополнительного компонента, вводимого в куб аппарата в виде острого пара. Метод используют для разделения смеси веществ с температурами кипения более 100 °С.

Аппарат в этом случае обогревается глухим паром через рубашку, а в нижнюю часть подают острый перегретый пар; он играет роль теплоносителя с одной стороны и способствует снижению $t_{\text{кип.}}$ – с другой. Образующиеся пары охлаждаются и конденсируются и направляются в сепаратор для разделения воды и дистиллятного продукта; дистиллят затем поступает в сборник продукта.

Ректификация позволяет достичь высокой степени разделения смесей на составляющие их компоненты. Процесс осуществляется путем многократного контакта между неравновесными жидкой и паровой фазами, движущимися противотоком. При взаимодействии происходит массообмен, обусловленный стремлением системы к состоянию равновесия. В результате каждого контакта компоненты смеси перераспределяются между фазами так, что пара обогащается НKK, а жидкость – ВKK. Многократное контактирование в итоге приводит к практически полному разделению смеси [5, 6].

Процесс осуществляют периодически или непрерывно (наиболее часто в нефтепереработке) при атмосферном или повышенном давлении, а также под вакуумом. Повышенное давление используют для разделения смесей компонентов с низкими температурами кипения, а вакуум – для разделения смесей высококипящих веществ, чтобы

избежать их разложения при высоких температурах.

Процесс ректификации осуществляют в аппаратах, называемых ректификационными колоннами. Помимо колонн в состав ректификационных установок входит теплообменное оборудование, емкости и насосы.

Перегонка относится к одному из самых энергоемких процессов, поэтому используется в технике только для получения технического дистиллята, либо в случае, когда стоимость осадка больше стоимости энергозатрат (упаренные пищевые или химические растворы, получение маточкиных растворов для кристаллизации и т.д.). Другими словами получение пресной воды методом перегонки будет экономически целесообразно только тогда, когда стоимость энергозатрат будет меньше стоимости самой воды.

Еще в 30-40-х годах прошлого столетия проф. Куком Г.А. была предложена энергосберегающая технология для вакуум-выпарных установок [7, 8, 9]. Полученный в аппарате вторичный пар сжимался турбокомпрессором или паровым эжектором и направляется в аппарат со стороны острого пара, что позволяет снизить расход греющего пара на 50-60%. Вопрос возможности использования в вакуум выпарных установка парокompрессора вместо парового котла муссируется до настоящего времени.

Широкое использование паровых турбокомпрессоров для сжатия пара ограничено большими удельными объемами (не менее 7,6 м³/кг), поэтому в технике нашли применение менее экономичные, но малогабаритные паровые эжекторы [10, 11]. В тоже время многие технологические процессы перегонки как в пищевой, так и в других видах промышленности могут протекать при нормальных условиях (p=100 кПа, t=100 °C) с удельным объемом вторичного пара 1,695 м³/кг, что позволяет для сжатия вторичного пара использовать поршневые или роторные компрессоры, имеющие более высокий к.п.д [12].

Обсуждение и результаты

Если учесть, что в компрессионном способе отсутствует расход тепла на конденсацию вторичного пара, то для сравнения взята только часть баланса с положительным подводом тепла.

Тогда традиционный тепловой баланс:

$$q_{\text{общ}} = q_n + q_{\text{исп}} + q_5 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau}, \quad (1)$$

Компрессионный тепловой баланс:

$$q_{\text{общ}}^{\kappa} = q_n + q_{\text{исп}}^{\kappa} + q_5 + q_e \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau}, \quad (2)$$

где $q_n = c_{n2o} (t_{\kappa} - t_n) \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau}$ – теплота нагрева

жидкости до кипения; $q_{\text{исп}} = r_0 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau}$ – скры-

тая теплота фазового перехода в пар при 1

бар; $q_{\text{исп}}^{\kappa} = r_{1,5} \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau}$ – скрытая теплота фазо-

вого перехода в пар при 1,5 бар; $q_5 = 15\%$

от $q_{\text{общ}}$ – потеря тепла в окружающую среду;

q_e – работа привода компрессора в кДж/кг.

В численном выражении:

традиционный:

$$q_{\text{общ}} = 4,187(100 - 10) + 2258 + 0,15q_{\text{общ}} = 3100 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} \quad (3)$$

компрессионный:

$$q_{\text{общ}} = 4,187(111 - 10) + 2226,8 - 5,2 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} = 2649,8 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} - 5,2 \left(\frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} \right) \quad (4)$$

Таким образом, видно, что дефицит тепла с учетом потери в окружающую среду

$q_5 = 0,15q_{\text{общ}}$ составит

$$\Delta q = q_{\text{общ}} - q_{\text{общ}} = 3100 - 2649,8 =$$

$$= 450 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} + 5,2 \frac{\kappa \Delta T_{\text{жс}}}{\kappa \tau} - \text{работа привода.}$$

На основе чего был сделан вывод: процесс компрессионной перегонки затухает и для непрерывной работы требует восполнения тепловой энергии 450 кДж/кг и 5,2 кДж/кг работы для привода парового компрессора при $P_{\text{сж}} = 1,5$ бар.

Обнаруженный дефицит тепловой энергии складывается:

а) за счет уменьшения численного значения скрытой теплоты парообразования при повышении его давления, и составляет

$$\Delta q = r_{1,0} - r_{1,56} \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{\kappa \text{г}}, \text{ который увеличивается с}$$

повышением давления;

б) энергии, необходимой для нагрева воды до кипения;

в) за счет потери энергии в окружающую среду поверхностями аппарата;

г) за счет энергии привода компрессора.

Для проверки теоретических предпосылок и получения опорного материала для проектирования компрессионных выпарных установок нами был смоделирован и изготовлен экспериментальный стенд, который состоит из электрического парового котла, моделирующего параметры греющего пара после компрессора, выпарной установки и контрольно-измерительных приборов, позволяющих определить: расход энергии парообразования, потерю тепла в окружающую среду. Замеры параметров производились в диапазоне давлений от 1 до 1,5 бар с интервалом давления 0,05 бар [13].

В результате эксперимента были получены зависимости изменения следующих параметров от величины давления греющего пара: температурного напора Δt ; общего коэффициента теплопередачи k ; удельного теплового потока q ; удельной производительности аппарата g ; потери тепла в окружающую среду q_5 ; дефицит тепла Δq [14].

Для определения работы привода использовалась зависимость:

$$l = \frac{PV_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \left[\frac{\Delta \text{жс}}{\kappa \text{г}^2} \right], \quad (5)$$

где P_2 – давление греющего пара, бар; $n=1,3$ – для водяного пара; $\eta=0,72$ – к.п.д. компрессора.

Основные результаты экспериментальных исследований сведены в графическую зависимость (рис. 1).

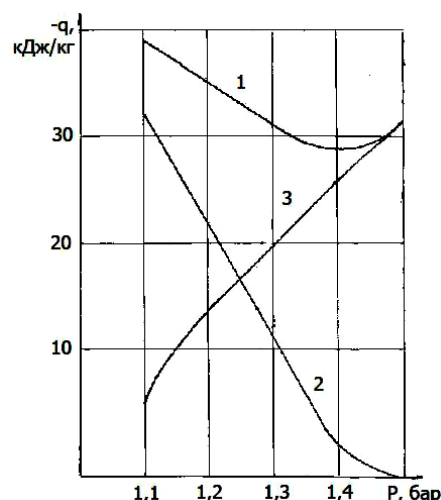


Рис. 1. Зависимость дефицита тепла «-q» прикомпрессионной перегонке (1); q_m – дефицит тепла на подогрев жидкости до кипения (2), Δg – дефицит тепла за счет изменения скрытой теплоты парообразования (3)

Выводы

1. Процесс компрессионной перегонки возможен только с дополнительным источником тепла.

2. Расход тепловой энергии на процесс системы «испаритель-компрессор вторичного пара-рекуператор» для нагрева воды до кипения, за счет полученного дистиллята, при потере в окружающую среду 6% (экспериментальная установка) составляет 31,4 кДж/кг или 1% от расхода тепла традиционной установки.

3. Расход энергии привода компрессора при $\eta=0,72$ не более 5,2 кДж/кг (0,16 %) или 2,1 Вт/кг.

4. Полный расход электроэнергии при электрическом варианте восполнения тепла 36,6 кДж/кг (1,18% от традиционного) или 10 Вт/кг.

5. При стоимости электроэнергии 2,94 р/(кВт час) – стоимость 1 м³ воды, полученной способом компрессионной перегонки составит 29,4 р/м³, что практически соответствует стоимости м³ питьевой воды в г. Севастополе.

6. При комбинированном способе возмещения дефицита тепла в компрессионном процессе перегонки (привод компрессора от электродвигателя тепловой дефицит за счет сжигания газа) то стоимость 1 м³ полученно-

го дистиллята можно довести до 15-20 р/м³, т.е. дешевле, чем стоимость питьевой воды [15].

7. Предлагаемый способ перегонки позволяет по-новому посмотреть на все водоснабжение в целом, использовать в промышленности замкнутые технологические циклы потребления воды, резко улучшить качество обрабатываемых стоков и т.п.

Список литературы

1. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности. – М.: Пищепромиздат – 1978. – 342 с.
2. Даниловцева А.Б. Технология отрасли: Часть 2 Технология водки и ликероводочных напитков / А.Б. Даниловцева, С.Ю. Макаров, И.Л. Славская // Учебно-практическое пособие. – М.: МГУТУ, 2010. – 79 с.
3. Ильина Е.В. Малые предприятия по производству пива, безалкогольных напитков, спирта и ликероводочных изделий: Учеб. пособие для пищев. вузов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 128 с.
4. Кретов И.Т., Антипов С.Т., Шахов С.В. Инженерные расчеты технологического оборудования предприятий броидильной промышленности. Учебное пособие для вузов. – М.: Колос, 2004. – 391 с.
5. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
6. Бачурин П.Я., Смирнов В.А. Технология ликерно-водочного производства. – М., Пищевая промышленность, 1975. – 326 с.
7. Кук Г.А. Новые течения в технике молочной промышленности / Г.А. Кук. – Л.: Снабтехиздат. Ленингр. отд-ние, 1934. – 55 с.
8. Кук Г.А. Теория и расчет основного оборудования молочной промышленности / Г.А. Кук. – Л.: Снабтехиздат, 1934. – 409 с.
9. Крупин Г.В. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности: учебное пособие для институтов пищевой пром-ти / Г.В. Крупин, Н.Я. Лукьянов, Ф.М. Тарасов; под ред. Кука Г.А. – М.: Пищепромиздат, 1953. – 595 с.
10. www.energycontrol.spb.ru.
11. Моторин А.В. Паровые турбины: Учебное пособие: в 2-х т. Т.2/ Моторин А.В., Распопов И.В., Фурсов И.Д.; Алт. гос. техн.ун-тим. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 129 с.
12. Бродов Ю.М. Конденсационные установки паровых турбин: Учебн. пособие для вузов /Ю.М. Бродов, Р.З. Савельев – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
13. Чернышев С.А. Энергосберегающий способ процесса перегонки / С.А. Чернышев, Д.О. Ерёменко, И.Н. Лебедев // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Випуск № 35, том 2. – Одеса, 2009. – С. 212-215.
14. Єрьоменко Д.О. Використання компресійної технології для отримання дистильованої води /Д.О. Єрьоменко, С.О. Чернишов, І.М. Лебедев І.М. – Праці / Таврійський державний агротехнологіч-

ний університет – Вип. 10. Т.1 – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – с. 75-80.

15. Єрьоменко Д.О. Основи енергозбереження у галузі харчових виробництв / Д.О. Єрьоменко, І.М. Заплетніков. Навч. посібник для студ. напр. підгот. 6.050503 “Машинобудування” спец. “Обладн. перероб. і харч. вир-в”. – Донецьк: [ДонНУ-ЕТ], 2012. – 260 с.

References

1. Kuk G.A. Processes and equipment for the dairy industry. – M.: Pishchepromizdat – 1978. – 342 p.
2. Danilovtseva A.B. Technology sector: Part 2 the Technology of vodka and other alcoholic beverages / A.B. Danilovtseva, S.U. Makarov, I.L. Slavskaja // Training manual. – M.: MGUTU, 2010. – 79 p.
3. Ilyina E.V. The Small enterprises for the production of beer, soft drinks, alcohol and alcoholic beverages / E.V Ilyina // Proc. allowance for food. universities. – M: Delhi print, 2006. – 128 p.
4. Kretov I.T. Engineering calculations of technological equipment of enterprises for fermentation industry // I.T Kretov, S.T. Antipov, S.V Shakhov // Textbook for high schools. – M.: Kolos, 2004. – 391 p.
5. Ryabchikov B.E. Modern methods of water treatment for industrial and domestic use. – M: Delhi print, 2004. – 328 p.
6. Bachurin P.J. The technology distillery production / P.J. Bachurin, V.A. Smirnov. – M.: Food industry, 1975. – 326 p.
7. Kuk G.A. New trends in technology of the dairy industry/ G.A. Kuk. – L.: Snabtekh-izdat. Leningr. otd-nie, 1934. – 55 p.
8. Kuk G.A. Theory and calculation of the main equipment of the dairy industry / G.A. Kuk. – L.: Snabtekhizdat, 1934. – 409 p.
9. Krupin G.V. Technological equipment of enterprises of dairy industry: textbook for institutes of food industry/ G.V. Krupin, N.Ia. Luk'ianov, F.M. Tarasov; under the editorship of Kuk G.A. – M.: Pishchepromizdat, 1953. – 595 p.
10. www.energycontrol.spb.ru.
11. Motorin A.V. Steam turbines: textbook: in 2 t T. 2/ Motorin A.V., Raspo-pov I.V., Fursov I.D.; Alt. gos. tekhn. un-ty. I.I. Polzunova.- Barnaul:Izd-voAltGTU, 2004. – 129 s.
12. Brodov Iu.M. The condensing unit steam turbines: Textbook for high schools /Iu.M. Brodov, R.Z. Savel'ev – M.: Energo-atomizdat, 1994. – 288 p.
13. Chernyshev S.A. Energy-saving way of distillation process / S.A. Chernyshev, D.O. Eremenko, I.N. Lebedev // Naukovi pratsi Odes'koї natsional'noї akademii kharchovikh tekhnologii. The issue No. 35, vol. 2. Odessa, 2009. – pp. 212-215.
14. Eremenko D.O. The use of compression technology to produce distilled water /D.O. Eremenko, S.O. Chernishov, I.M. Lebedev I.M. – Works / Tavria state agrotechnological University – N. 10. T.1 – Melitopol: TDA TU, 2010. – p. 75-80.
15. Eremenko D.O. The basics of energy saving in the field of food production / D.O. Eremenko, I.M. Zapletnikov. Textbook for stud. of direction of train. 6.050503 “Machine-building” spec. “Equipment of proc. and food industry”. – Donetsk: [DonNUET], 2012. – 260 p.

УДК 621.785.5

ЗАКАЛОЧНАЯ УСТАНОВКА УДГЗ-200 ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И ШТАМПОВ

В.А. Коротков¹¹Филиал Уральского федерального университета, Нижний Тагил, Российская федерация

Аннотация

Установка УДГЗ-200 позволяет закалывать, что было невозможно. После закалки детали направляются на сборку без финишного отпуска и шлифовки, что дает сокращение трудоемкости. Закаленные детали машин и штампы многократно увеличивают срок службы.

Ключевые слова: закалка, детали машин, штампы, износостойкость.

HARDENING PLANT UDGZ-200 TO REDUCE PRODUCTION COSTS AND INCREASE THE DURABILITY OF PARTS AND STAMPS

V.A. Korotkov¹¹Branch of the Ural Federal University. Nizhny Tagil, Russian Federation

Abstract

Installation UDGZ-200 allows you to harden, which was impossible. After hardening, the parts are sent to the assembly without finishing and grinding, which leads to a reduction in labor intensity. Hardened machine parts and stamps repeatedly improve the service life.

Keywords: hardening, machine parts, dies, wear resistance.

Закалка замедляет изнашивание, но не всегда применима по конструкционным и технологическим причинам. Сделать закалку более доступной позволяет установка УДГЗ-200 (поставщик: тел. +7-909-013-2020, admin@udgz.ru, <http://1m63.ru/katalog-stankov/UDGZ200>). Выпущено более 100 установок для предприятий России, Украины, Казахстана, Азербайджана, Беларуси, Киргизии. В них предусмотрена горелка, небольшие размеры которой делают ее удобной для ручного манипулирования (рис. 1), и позволяют добираться до труднодоступных мест, т.е. упрочнять то, что ранее оставалось без закалки [1-10].

При закалке сварщик перемещает дугу (рис.1.) по поверхности со скоростью, обеспечивающей «вспотевание» (состояние предшествующее плавлению) поверхности под дугой. Это контролировать не трудно, но его достаточно для закалки без повреждения поверхности плавлением [11-13].



Рис. 1. Закалка установкой УДГЗ-200

Дуга оставляет закаленные полосы шириной 8...12 мм, которые сварщик располагает с некоторым перекрытием. Закалка происходит за счет отвода тепла в тело детали без подачи воды на место нагрева. Поэтому установка УДГЗ-200 применяется на ремонтных площадках, по месту механооб-

работки и эксплуатации деталей, а не только в термических цехах и специализированных участках. Работу на установке осваивают сварщики 2...3 разрядов. Наличие установки УДГЗ-200 восполняет отсутствие печей для закалки, цементации, установок ТВЧ; делает закалку экологически чистой. Твердый слой закалки (HRC35...65 - в зависимости от содержания углерода) толщиной 0,5...1,5 мм, обладающий высокой износостойкостью [2, 3] многократно увеличивает срок службы крановых рельс и колес, зубчатых и шлицевых соединений, канатных блоков, вырубных, формовочных, вытяжных штампов и других ответственных деталей [14-15].

Размеры закалочной горелки установки УДГЗ-200 позволяют закаливать зубья шестерен с модулем $m \geq 5$. Закалка производится по боковой поверхности зуба. Впадины между зубьями не закаливаются. При закалке ТВЧ это вызывает поломки зубьев при эксплуатации, но плазменная закалка к поломкам не приводит, т.к. производится последовательно, тогда как закалка ТВЧ – одновременно по всему профилю, с наведением высоких остаточных напряжений. Закалка установкой УДГЗ-200 зубчатых колес (сталь 35Л, $z - 90$, $m - 24$) сталеразливочного крана грузоподъемностью 225 т увеличила срок службы с 6 мес. до 17 мес., т. е. в 2,8 раза. Эта технология применяется с 2004 г. по настоящее время. Подобный результат получен при закалке зубчатого венца (сталь 35ГЛ) смесительной машины. Но его, из-за больших размеров (диаметр ~ 6 м), закаливали на шихтовом дворе под открытым небом, что составляет важное преимущество установки УДГЗ-200.

Разрезная зубчатая муфта (рис. 2) для бурового станка при объемной закалке, или цементации дает недопустимую деформацию, а закалка ТВЧ (зубьев и внутренней нажимной поверхности) и азотирование слишком дорогостоящие. Проблема была успешно решена применением установки УДГЗ-200. При передаче труб большого диаметра $\varnothing 530-820$ с участка сварки на участок отделки используются скоростные передаточные тележки, передвигающиеся по рельсам типа А55, поставляемым из Герма-

нии. Их срок службы составлял 3–4 месяца, а на наиболее нагруженных участках ускорения и торможения – 2...6 недель.



Рис. 2. Разрезная зубчатая муфта с плазменной закалкой

После плазменной закалки рельсов и тележечных колес, срок службы рельсов возрос до 4–5 лет, т. е. в 12–20 раз.

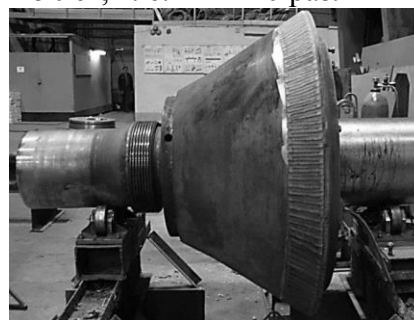


Рис. 3. Конус дробилки с плазменной закалкой

Конуса дробилок среднего дробления КСМД-2200, Сандвик Н7800, ФКВ-2100 и т.п. быстро изнашиваются по поясу прилегания дробящей брони. Применение плазменной закалки на Качканарском ГОКе сократило частоту их ремонтов в 5 раз.

В ручьях канатных барабанов и шкивов изнашивание канатными прядями создает гребенчатый рельеф, ускоряющий изнашивание самих канатов. Плазменная закалка ручьев в три раза увеличивает срок службы шкивов (рис. 4) и на 20% продлевает срок службы канатов.

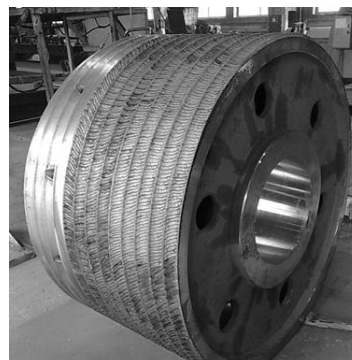


Рис. 4. Канатный барабан с плазменной закалкой



Рис. 5. Бункер, футерованный листами с плазменной закалкой

Стенки приемного бункера пресс-ножниц для резки металлолома на мерные отрезки облицовывают защитными листами из стали 65Г. Для придания износостойкости листы закаливают. При закалке листы деформируются, и для их выравнивания требуется фрезеровка. Чтобы фрезеровка была возможной, закаленным листам производят отпуск, понижающий твердость от HRC 55 до HRC 35, чем уменьшают их сопротивление износу (уменьшают срок службы). Плазменная закалка уже закрепленных в бункере листов (рис. 5) увеличила срок службы футеровки вдвое. При этом листы приобретались без припуска на фрезеровку, что на 30% сократило закупочные расходы.

На вагоностроительном заводе в связи с переходом на более прочную категорию металлопроката увеличился расход вырубных штампов. В связи с этим применена плазменная закалка установкой УДГЗ-200. Это обеспечило сокращение расхода штампов в 2,5 раза.



Рис. 6. Фрагмент разрезного штампа после плазменной закалки

Иные штампы сначала разрезают на фрагменты для объемной закалки в печах, а затем подгоняют в единое целое. Чтобы исключить трудоемкую подгонку закаленных фрагментов, их выполнили по чертежным размерам, а объемную закалку заменили

плазменной (рис. 6). Фрагменты собрались без слесарной подгонки, что дало снижение себестоимости изготовления на 30%. Эксплуатация штампа показала, что трудоемкость ремонтных «зачисток» уменьшилась многократно.

Таблица 1. Сопоставление технологических процессов изготовления

С объемной закалкой	С плазменной закалкой
Нормализация поковки	Нормализация поковки
Транспортировка с термического участка на механический участок	Транспортировка с термического на механический участок
Черновая обработка	Черновая и чистовая обработка, плазменная закалка
Транспортировка с механического на термический участок	-
Объемная закалка с отпуском	-
Транспортировка с термического на механический участок	-
Чистовая обработка	-

В (табл. 1) проведено сравнение техпроцессов изготовления деталей с объемной и плазменной закалкой установкой УДГЗ-200.

Можно по ней видеть, что с плазменной закалкой техпроцесс вдвое короче.

Выводы

Значительным событием в расширении сферы применения закалки в производстве деталей машин и штампов стала разработка в 2002 г установки УДГЗ-200. Это единственная, выпускающаяся серийно, специализированная установка для ручной плазменной закалки. С ее помощью закаливается, что было не доступно. Работу ней осваивают сварщики 2-3 разрядов, поэтому внедрение установки происходит без затруднений. Установка УДГЗ-200 может размещаться не только в термических цехах, но и на механических и сборочных участках. Ее применение снижает трудоемкость производства и многократно увеличивает срок службы деталей и штампов.

Список литературы

1. Коротков В.А. Оборудование для поверхностной закалки. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2012. №11. С.43-45.
2. Структура закаленных углеродистых сталей после плазменного поверхностного нагрева / А. А. Бердников, М. А. Филиппов, Е. С. Студенок // МиТОМ, 1997. № 6. С. 2-4.
3. Коротков В. А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой. //Трение и износ, 2011. Т.32. №1. С. 23-29.
4. Коротков В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. – Челябинск: Металла, 1993. – 144 с.
5. Бердников А. А. Упрочнение чугуновых валков методом плазменной закалки / А. А. Бердников [и др.] // Сталь. – 1995. – № 1. – С. 56–59.
6. Коротков В. А. Восстановление и упрочнение роликов рольгангов / В. А. Коротков, Л. В. Баскаков, И. А. Толстов, А. А. Бердников // Сварочное производство. – 1991. – № 3. – С. 31–33.
7. Коротков В. А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления / В. А. Коротков, О. В. Трошин, А. А. Бердников // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 2. – С.106–111.
8. Иванов П. П. Эффективный способ поверхностного упрочнения ж/д колес / П. П. Иванов [и др.] // Сталь. – 2000. – № 1. – С. 63–66.
9. Давыдов В. Н. Особенности электродуговой поверхностной закалки валковых сталей / В. Н. Давыдов [и др.]// Бюл. «Черная металлургия». – 1990. – № 5. – С. 58–60.
10. Коротков В. А. 10 лет применению ручной плазменной закалки / В. А. Коротков // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 2–5.
11. Белинин Д. Плазменная закалка плит опорной пары мостовой конструкции [Электронный ресурс] /Д. Белинин// Конкурс научнотехнического творчества молодежи. – Ульяновск, 2011. – Режим доступа: <http://ify.ulstu.ru>, свободный.
12. Коротков В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев А. В. Шекуров// Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.
13. Коротков В. А. Наноструктурирование стали плазменной дугой / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, В. Я. Шур, Е. И. Шишкин // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С.5–7.
14. Ананьев С. П. Исследование износостойкости материала крановых рельс и колес / С. П. Ананьев, В. А. Коротков// Вестник машиностроения, 2011. – № 8. – С. 35–37.
15. Коротков В.А. Плазменная закалка чугуновых штампов / В. А. Коротков, А. В. Шекуров, Д. С. Бабайлов, А. С. Зотов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2007. – № 1. – С.31–34.

References

1. Korotkov V.A. Oborudovanie dlia poverkhnostnoi zakalki. // Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie, 2012. №11. S.43-45.
2. Struktura zakalennykh ugleodistykh stalei po-sle plazmennogo poverkhnostnogo nagreva / A. A. Berdnikov, M. A. Filippov, E. S. Studenok // MITOM, 1997. № 6. S. 2-4.
3. Korotkov V. A. Iznosostoikost' materialov s plazmennoi zakalkoi. //Trenie i iznos, 2011. T.32. №1. S. 23-29.
4. Korotkov V. A. Vosstanovlenie i uprochnenie detalei i instrumenta plazmennymi tekhnologi-ami / V. A. Korotkov, A. A. Berdnikov, I. A. Tolstov. – Cheliabinsk: Metalla, 1993. – 144 s.
5. Berdnikov A. A. Uprochnenie chugunnykh valkov metodom plazmennoi zakalki / A. A. Berdnikov [i dr.] // Stal'. – 1995. – № 1. – S. 56–59.
6. Korotkov V. A. Vosstanovlenie i uprochnenie rol'gangov / V. A. Korotkov, L. V. Baskakov, I. A. Tolstov, A. A. Berdnikov // Svarochnoe proizvodstvo. – 1991. – № 3. – S. 31–33.
7. Korotkov V. A. Plazmennaiia zakalka skaniruemoi dugoi bez oplavleniia / V. A. Korotkov, O. V. Troshin, A. A. Berdnikov // Fizika i khimiia obrabotki materialov. – 1995. – № 2. – S.106–111.
8. Ivanov P. P. Effektivnyi sposob poverkhnostnogo uprochneniia zh/d koles / P. P. Ivanov [i dr.] // Stal'. – 2000. – № 1. – S. 63–66.
9. Davydov V. N. Osobennosti elektrodugovoi poverkhnostnoi zakalki valkovykh stalei / V. N. Davydov [i dr.]// Biul. «Chernaia metallurgii». – 1990. – № 5. – S. 58–60.
10. Korotkov V. A. 10 let primeneniuiu ruchnoi plazmennoi zakalki / V. A. Korotkov // Tiazheloe mashinostroenie. – 2012. – № 1. – S. 2–5.
11. Belinin D. Plazmennaiia zakalka plit opornoii pary mostovoi konstruktssii [Elektronnyi re-surs] /D. Belinin// Konkurs nauchno-tekhnicheskogo tvorchestva molodezhi. – Ul'ia-novsk, 2011. – Rezhim dostupa: <http://ify.ulstu.ru>, svobodnyi.
12. Korotkov V. A. Issledovanie vliianiia skorosti okhlazhdeniia na kachestvo poverkhnostnogo sloia pri plazmennoi zakalke / V. A. Korotkov, S. P. Anan'ev A. V. Shekurov// Svarochnoe proizvodstvo. – 2012. – № 3. – S. 23–27.
13. Korotkov V. A. Nanostrukturirovanie stali plazmennoi dugoi / V. A. Korotkov, S. P. Anan'-ev, V. Ia. Shur, E. I. Shishkin // Tekhnologiiia mashinostroeniia. – 2011. – № 4. – S.5–7.
14. Anan'ev S. P. Issledovanie iznosostoikosti materiala kranovykh rel's i koles / S. P. Anan'-ev, V. A. Korotkov// Vestnik mashinostroeniia, 2011. – № 8. – S. 35–37.
15. Korotkov V.A. Plazmennaiia zakalka chugunnykh shtampov / V. A. Korotkov, A. V. Shekurov, D. S. Babailov, A. S. Zotov // Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia. – 2007. – № 1. – S.31–34.

УДК 62.93

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗРЕЗОНАНСНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н.В. Мулюхин¹, В.Д. Лобанов¹¹ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская федерация

Аннотация

В работе раскрыта область применения вибрационных систем в различных отраслях промышленности. Отмечены недостатки традиционных устройств и преимущества безрезонансных вибросистем. Рассмотрены вопросы моделирования безрезонансных вибрационных систем, определение основных параметров и технических характеристик рабочих органов на примере вибропогружателя для свайных элементов. Рассмотрены вопросы автоматизированного проектирования вибрационных систем, силового, прочностного и кинематического расчета основных элементов конструкции в программных комплексах NX, Euler, Ansys. Представленный алгоритм позволяет уменьшить трудозатраты проектирования безрезонансных вибрационных систем, снизить себестоимость продукции и повысить эффективность труда инженера-конструктора. Определены перспективы развития тематики исследования.

Ключевые слова: моделирование, вибрация, безрезонансные вибрационные системы, автоматизированное проектирование, вибропогружатель.

SIMULATION OF NON-RESONANT VIBRATION SYSTEMS

N.V. Muliukhin¹, D.V. Lobanov¹¹Federal State Educational Budget Institution of Higher Professional Education «The Ulianov Chuvash State University», Cheboksary, Russian Federation

Abstract

The scope application of vibrating systems in various branches industry is disclosed in the work. The shortcomings of traditional devices and the advantages of resonance-free vibro-systems are noted. The problems simulation of resonance-free vibrating systems, determination of the main parameters and technical characteristics of the working bodies for the example a vibrating load for pile elements are considered. The problems of computer-aided design vibration systems, power, strength and kinematic calculation of the basic design elements in software complexes NX, Euler, Ansys are considered. The presented algorithm makes it possible to reduce the labor costs design of resonance-free vibration systems, reduce the cost of production and increase the efficiency of the engineer. Prospects for the development of research subjects were determined.

Keywords: simulation, vibration, resonance-free vibration systems, computer-aided design, vibrator.

Вибрационные системы используются во многих отраслях промышленности в различных видах устройств механизмах и агрегатах: в строительно-дорожной технике, в горной промышленности, строительстве, металлургии, химии, медицине и машиностроении и др.

В медицине вибросистемы используется при изготовлении вибрационных столов, платформ, кроватей, кресел и т. д. В машиностроении вибросистемы встречаются при производстве заготовок (вибросито, галтовочные установки, виброуплотнители стержневых смесей). В химической промышленности - вибрационные аппараты для

интенсификации физических процессов и химических реакций. В дорожно-строительной технике – виброкатки, заглаживающие устройства. В строительстве – вибропогружатели, вибромолоты, вибромельницы, вибропитатели и т.д.

Существующие традиционные вибрационные системы создают колебательные движения зачастую несопоставимые с нормируемыми показателями. Способы, заложенные в основу работы вибрационных систем, сопровождаются широким распространением колебаний, связанных с работой устройств, вызывают возникновение в прилегающих областях резонансных явлений, что отрица-

тельно сказывается на соседствующих объектах, негативно влияет на работников, находящихся в зоне действия системы и, зачастую, может являться причиной аварийных ситуаций [1]. Изучением вибрационных систем в различных отраслях промышленности занимались многие авторы, затрагивая вопросы создания конструкций, выбора рациональных параметров систем, моделирования вибропроцессов и устройств для их реализации [2-13]. Но в этих работах мало затрагивается влияние явления резонанса на технику и человека.

Выходом из ситуации негативного влияния вибрации является применение безрезонансных вибрационных систем. Их применение значительно минимизирует влияние негативных процессов в рабочей зоне на технику, окружающую среду и человека. Безрезонансные устройства сконструированы таким образом, что воздействие вибрационных колебаний сконцентрировано на рабочем элементе, а передача колебаний на рядом располагаемые области минимизировано. Однако традиционное проектирование таких систем и подбор рациональных конструктивных, динамических и кинематических параметров процесс достаточно длительный и затратный. Это приводит к удорожанию устройств, механизмов и агрегатов, что в свою очередь сказывается на конкурентоспособности продукции.

В связи с этим, актуальными являются вопросы моделирования, автоматизации проектирования, конструирования и выбора рациональных параметров безрезонансных вибрационных систем с использованием современных программных комплексов, что значительно снижает трудоемкость проектирования, себестоимость механизмов и устройств, уменьшает время принятия проектных решений и повышает точность инженерных расчетов [14].

В качестве примера реализации системного подхода проектирования безрезонансных вибрационных систем рассмотрим мо-

делирование вибропогружателя, используемого в строительстве для погружения шпунтовых конструкций (например, свай) для устройства фундаментов, оснований, подпорных конструкций, при ремонтных и укрепительных работах.

Принцип работы вибропогружателя заключается в эффекте снижения сопротивления погружения свайного элемента при содействии последнему вибрации.

Вибропогружатель состоит из вибровозбудителя, электродвигателя и наголовника.

При вращении дисбалансов на их ось крепления действует центробежная сила и вибропогружатель получает вибрирующее движение, которое сообщает свайному элементу через наголовник. Дисбалансы приводятся во вращение электродвигателем через механическую передачу (или непосредственно от вала мотора). Симметрично расположенные дисбалансы синхронно вращаются в разные стороны для уравнивания радиальных нагрузок.

Для решения проблемы моделирования и автоматизированного проектирования безрезонансных вибрационных систем изначально необходимо знать входные параметры конструкции и технические характеристики устройства. В качестве входных параметров модели выбраны частота вращения вала и масса дисбалансов, выходными параметрами модели являются динамические и кинематические характеристики исследуемой системы: сила погружения (извлечения), амплитуда колебаний и т.д.

В основу создания модели системы заложены законы динамики и функционирования вибрационных систем, широко описанные в специальной литературе [15]. Изначально, исходя из нагрузки на ведущий вал механизма выбираются подшипники скольжения, соответствующие заданным условиям работы. Далее с использованием графического CAD редактора NX 11 строим 3D модель устройства (рис. 1).

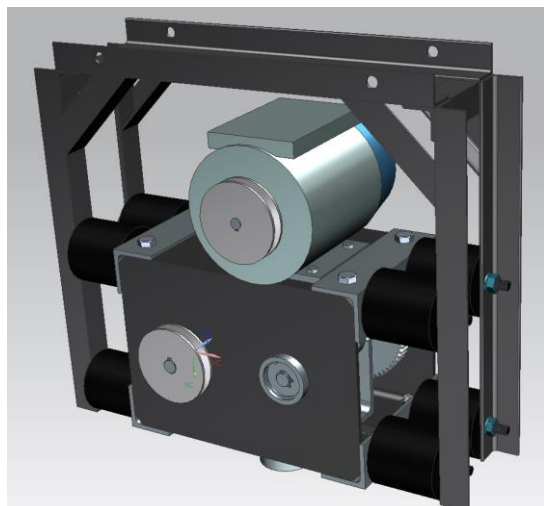


Рис.1. 3D модель узла вибропогружателя

С помощью 3D модели рассчитываются массово-центровочные характеристики узла вибропогружателя. На основе спроектированной модели в программной среде Euler 10.11 Pro строим динамическую модель узла с учетом ранее полученных данных (рис. 2).

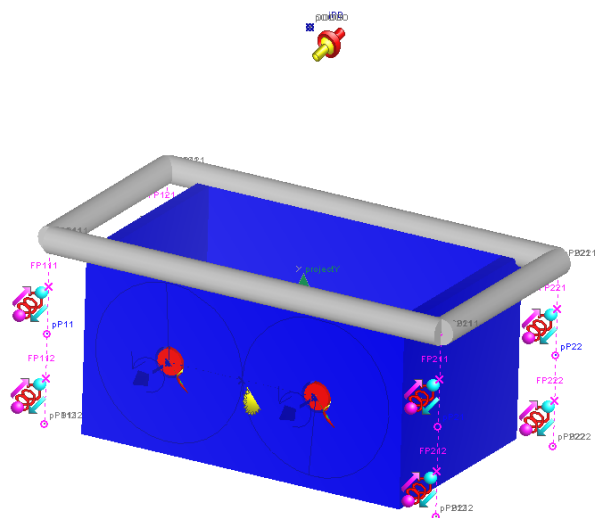
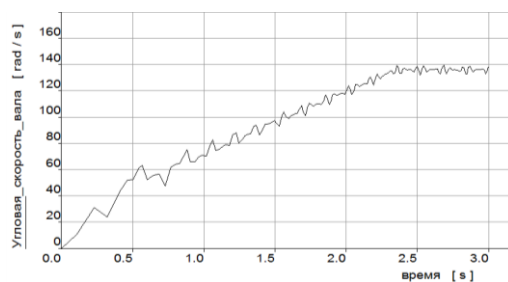
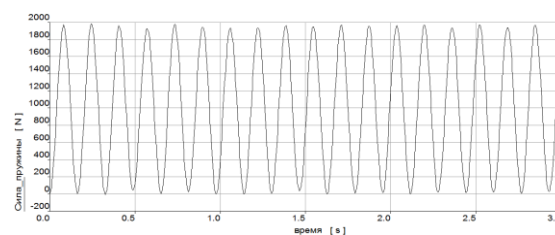


Рис. 2. Динамическая модель узла вибропогружателя

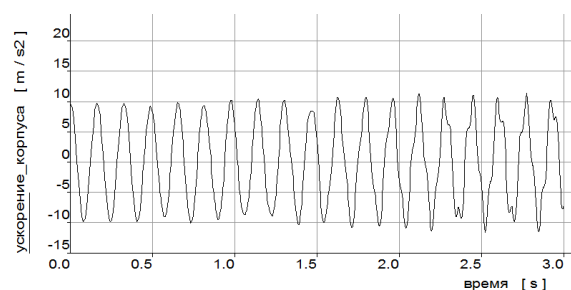
Заложив в динамическую модель необходимые входные параметры, имеем возможность получить графики зависимости скорости, ускорения, усилий и т.д. от времени работы узла, позволяющие вести проектные и силовые расчеты компонентов конструкции на модели. В качестве примера на (рис. 3) показана зависимость угловой скорости ведущего вала от времени работы.



а)



б)



в)

Рис. 3. Графики зависимости от времени работы узла вибропогружателя

а) угловой скорости ведущего вала;
б) усилие пружины; в) ускорение корпуса

На основе полученных данных из динамической модели, например, ускорение корпуса, усилие пружины в программном комплексе Ansys R18 определяем работоспособность компонентов узла вибропогружателя. В качестве расчетного примера на рис. 4 приведены результаты расчета на прочность дебаланса вибропогружателя.

Применение предложенной технологии имитационного моделирования и расчетов позволяет значительно снизить трудоемкость проектирования безрезонансных вибрационных систем с учетом варьируемых входных параметров, повысить точность проектных расчетов, существенно упростить процесс создания новых систем и модернизацию ранее существующих систем с учетом результатов расчета полученных при моделировании.

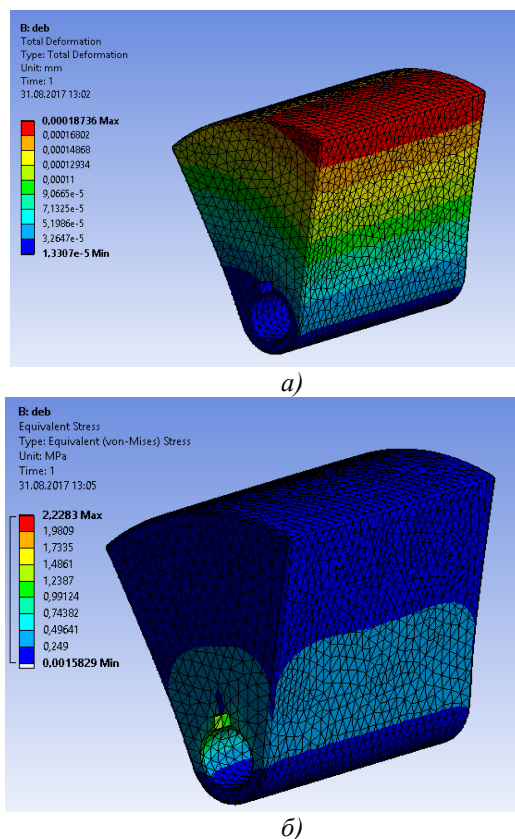


Рис. 4. Расчетные модели узла дебаланса в программном комплексе Ansys R18
а) деформаций
б) эквивалентных напряжений

Следующим этапом исследования планируется создание экспериментальной установки для апробации полученных результатов моделирования в лабораторных условиях. Это позволит оценить адекватность полученных моделей и разработать систему рекомендаций по проектированию безрезонансных вибрационных систем.

Список литературы

1. Соколов Н.С., Карасев А.В. Влияние ошибок проектирования и технического обследования на эксплуатацию здания // В сборнике: Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции Материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции. Редакционная коллегия: Н.С. Соколов (отв. редактор), Д.Л. Кузьмин (отв. секретарь), А.Н. Плотников, Л.А. Сакмарова, А.Г. Лукин, В.Ф. Богданов, В.И. Тарасов. 2014. С. 322-328.
2. Томчина О.П., Горлатов Д.В. Влияние эксцентриситетов роторов на вибрационное поле виброустановок для транспортирования сыпучих строительных материалов: сб: Архитектура – Строительство – Транспорт материалы 71-й

- научной конференции профессоров, преподавателей научных работников, инженеров и аспирантов университета. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2015. С. 215-218.
3. Гендлина Л.И., Куликова Е.Г., Усольцев В.М. Численное моделирование вибрационного взаимодействия упругого рабочего органа с основанием // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т.2. №3 С. 40-44.
4. Епишкин А.Е., Шестаков В.М. Взаимосвязанные электромеханические системы четырехроторных вибрационных установок // Электричество. 2011. №2. С. 64-68.
5. Пономарев Ю.К., Котов А.С., Евсигнеев А.Е. Современные методы борьбы с вибрацией трубопроводной систем нефтегазовой отрасли / Экспозиция Нефть Газ. 2011. № 6. С. 12-15.
6. Методика уравнивания роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, Д.В. Лобанов, А.А. Жирова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. №2(71). С. 41-50.
7. Исследование регенеративных колебаний при токарной обработке нежестких валов / В.М. Свиинин, Е.А. Пешкова, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. 2016. №3(31). С. 47-52.
8. Оптимизация функционирования электромеханических систем вибрационных установок / Шестаков В.М., Епишкин А.Е., Белокузов Е.В. // Инструмент и технологии. 2012. № 35. С. 63-67.
9. Томчин Д.А., Фрадков А.Л. Управление прохождением через область резонанса при пуске двухроторных вибрационных установок // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 91.
10. Условия эффективного использования вибрационной техники на автомобильных отвалах Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Морозов А.В., Алексик М.Ю., Усольцев В.М. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №5. С. 230-234
11. Comparative analysis of two control algorithms of resonant oscillations of the vibration machine driven by an asynchronous ac motor / Panovko G., Shokhin A., Ereneykin S., Gorbunov A. // Journal of Vibroengineering. 2015. Т. 17. №4. С. 1903-1911.
12. Control of damping for multi-layer vibration insulators with dry friction on contact surfaces / Ponomarev Y.K. // International Journal of Engineering and Technology. 2014. Т. 6. № 5. С. 2225-2228.
13. Controlled passage through resonance for two-rotor vibration unit: influence of drive dynamics / Gorlatov D.V., Tomchina O.P., Tomchin D.A. // IFAC-PapersOnLine. 2015. Т. 48. №11. С. 313-318.
14. Томчина О.П., Горлатов Д.В., Белов Ф.А. Комплекс моделей многороторных вибрационных

установок: от модели к эксперименту // Информатика и системы управления. 2017. №2(52). С. 25-36.

15. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Под ред. Э.Э. Лавендела. – 1981. Т.4. - 509 с.

References

1. Sokolov N.S., Karasev A.V. Influence of errors in design and technical inspection on the operation of the building // V sbornike:Novoe v ar-khitekture, proektirovanii stroitel'nykh konstruksii i rekonstruktsii Materialy VIII Vserossiiskoi (II Mezhdunarodnoi) konferentsii. Redak-tsionnaia kollegiia: N.S. Sokolov (otv. redaktor), D.L. Kuz'min (otv. sekre-tar'), A.N. Plotnikov, L.A. Sakmarova, A.G. Lukin, V.F. Bogdanov, V.I. Tara-sov. 2014. pp. 322-328.
2. Tomchina O.P., Gorlatov D.V. Effect of eccentricity of rotors on the vibration field of vibration plants for the transport of loose building materials: sb: Arkhitektura – Stroitel'stvo – Transport materialy 71-i nauchnoi konferentsii professorov, prepodavatelei nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet. 2015. pp. 215-218.
3. Gendlina L.I., Kulikova E.G., Usol'tsev V.M. Numerical simulation of vibrational interaction of an elastic working body with a base //Interekspo Geo-Sibir'. 2015. T.2. No3 pp. 40-44.
4. Epishkin A.E., Shestakov V.M. Interconnected electromechanical systems of four-rotor vibration plants//Elektrichestvo. 2011. No 2. pp. 64-68.
5. Ponomarev Iu.K., Kotov A.S., Evsigneev A.E. Modern methods of fighting the vibration of the oil and gas pipeline system / Ekspo-zitsiia Neft' Gaz. 2011. No 6. pp. 12-15.
6. Technique of balancing rotors of technological machines/ Iu.I. Podgornyi, T.G. Martynova, V.Iu. Skiba, D.V. Lobanov, A.A. Zhironova, A.N. Bredikhina, A.S. Kosilov, N.S. Pechorkina // Obrabotka metallov (tekhnologiiia, oborudovanie, instrumenty). 2016. No 2(71). pp. 41-50.
7. Investigation of regenerative oscillations during turning processing of nonrigid rolls/ V.M. Svinin, E.A. Peshkova, D.V. Lobanov, V.Iu. Skiba // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2016. No 3(31). pp. 47-52.
8. Tomchin D.A., Fradkov A.L. Controlling the passage through the region of resonance during the start-up of two-rotor vibration units // Pro-blemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin. 2007. No 4. pp. 91.
9. Conditions for the effective use of vibration technology in automobile dumps Levenson S.Ia., Gendlina L.I., Morozov A.V., Alesik M.Iu., Usol'tsev V.M. // Gornyi infor-matsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2011. No 5. pp. 230-234
10. Comparative analysis of two control algorithms of resonant oscillations of the vibration machine driven by an asynchronous ac motor / Panovko G., Shokhin A., Ereneykin S., Gorbunov A. // Journal of Vibroengineering. 2015. T. 17. No 4. pp. 1903-1911.
11. Control of damping for multi-layer vibration insulators with dry friction on contact surfaces / Ponomarev Y.K. // International Journal of Engineering and Technology. 2014. T. 6. No 5. pp. 2225-2228.
12. Controlled passage through resonance for two-rotor vibration unit: influence of drive dynamics / Gorlatov D.V., Tomchina O.P., Tomchin D.A. // IFAC-PapersOnLine. 2015. T. 48. No 11. pp. 313-318.
13. Optimization of the functioning of electromechanical systems of vibration plants / Shestakov V.M., Epishkin A.E., Belokuzov E.V. // Instrument i tekhnologii. 2012. No 35. pp. 63-67.
14. Tomchina O.P., Gorlatov D.V., Belov F.A. A complex of models of multi-rotor vibration plants: from model to experiment // Informatika i sistemy upravleniia. 2017. No 2(52). pp. 25-36.
15. Vibrations in technology: Spravochnik v 6 t. / Pod red. E.E. Lavendela. – 1981. T.4. - 509 pp.

УДК 621.9.02

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩИХ МЕТЧИКОВ

П.А. Новиков¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В работе на основе анализа обоснован выбор формы и геометрии стружечной канавки, расположенной на рабочей части деформирующе-режущих метчиков. При выборе формы канавки в качестве критериев использовано: отсутствие заклинивания при реверсировании инструмента; уменьшение технологических трудностей формирования элемента при изготовлении метчика. Предложены математические модели и показан путь определения размеров стружечной канавки как функции производительности удаления стружки. Предложенная форма стружечной канавки и математические модели определения ее размеров могут быть применены не только при проектировании деформирующе-режущих метчиков, но и традиционных режущих инструментов - сверл, зенкеров, разверток и метчиков.

Ключевые слова: инструмент, проектирование, деформирующе-режущий, стружечная канавка.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE FLUTE OF DEFORMING-CUTTING TAPS

P.A. Novikov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

In work on the basis of the analysis, the choice of the shape and geometry of the flute located on the working part of the deforming-cutting taps is justified. When choosing the shape of the groove, the following criteria were used as criteria: no jamming when reversing the tool; reduction of technological difficulties in the formation of the element in the manufacture of the tap. Mathematical models are proposed and the way to determine the size of the flute as a function of chip removal efficiency is shown. The proposed shape of the flute and mathematical models for determining its dimensions can be applied not only when designing deforming-cutting taps, but also traditional cutting tools - drills, countersinks, reamers and taps.

Keywords: the tool, design, deforming-cutting, the flute.

Введение

Конструкция инструмента определяется геометрией его рабочих и вспомогательных элементов [1, 2]. Соответственно, одним из основных этапов в разработке новых инструментов является определение геометрических параметров элементов и их взаимного соотношения [2-5].

Одним из основных вспомогательных элементов метчика является стружечная канавка. Этот элемент расположен на рабочей части метчика. Его форма, геометрия и размеры определяют не только прочность и жесткость инструмента, но также своевре-

менное, беспрепятственное удаление образованной в процессе формирования резьбы стружки [6-9].

В предложенных конструкциях деформирующе-режущих метчиков [10-13] предусмотрен как деформирующий рабочий зуб, так и режущий. Наличие режущих рабочих элементов в конструкции метчика определяет необходимость стружечной канавки, а соответственно определения ее формы, геометрии и размеров.

Целью данной работы является осуществление анализа и выбора формы и геометрии стружечной канавки для деформирующе-режущих метчиков, определение математических моделей ее размеров как

функции от производительности удаления стружки.

Результаты и обсуждение

На (рис. 1) представлены наиболее часто встречающиеся в конструкциях метчиков виды профилей поперечных сечений стружечных канавок [4-8]. Исполнение 1 (см. рис. 1) и исполнение 2 используются в конструкции мелкогабаритных метчиков, причем профиль исполнения 1 используется в инструментах с диапазоном стандартных размеров от М3 до М6, а профиль исполнения 2 используется лишь для инструмента с типоразмером М6. Профили исполнения 3 и 4, применяются для метчиков с размерами от М8 до М52.

Проведенный обзор показал, что точно сформулированных требований к профилю стружечных канавок не существует, имеется лишь рекомендация [8, 14], касающаяся угла η (рис. 2), который должен лежать в пределах $85^\circ \dots 90^\circ$. Такой диапазон значений угла η объясняется тем, что в момент реверсирования спинка зуба на своем пути встречает надрезанную но не отделенную стружку, которая может привести к заклиниванию и поломке метчика. Для предотвращения этой ситуации необходимо, чтобы угол η не был острым [14].

Профили, используемые для метчиков М3...М6, не удовлетворяют приведенной рекомендации. Так, угол η составляет: для профиля исполнения 1, в зависимости от типоразмера $\eta = 58^\circ \dots 62^\circ$; для профиля исполнения 2 – $\eta \approx 80^\circ$. Такие значения угла η приводят к частому заклиниванию инструмента из-за попадания стружки и к его поломке в момент реверсирования. Единственным объяснением использования данного профиля для метчиков М3...М6 является технологическая сложность получения иного профиля, обусловленная малым размером инструмента.

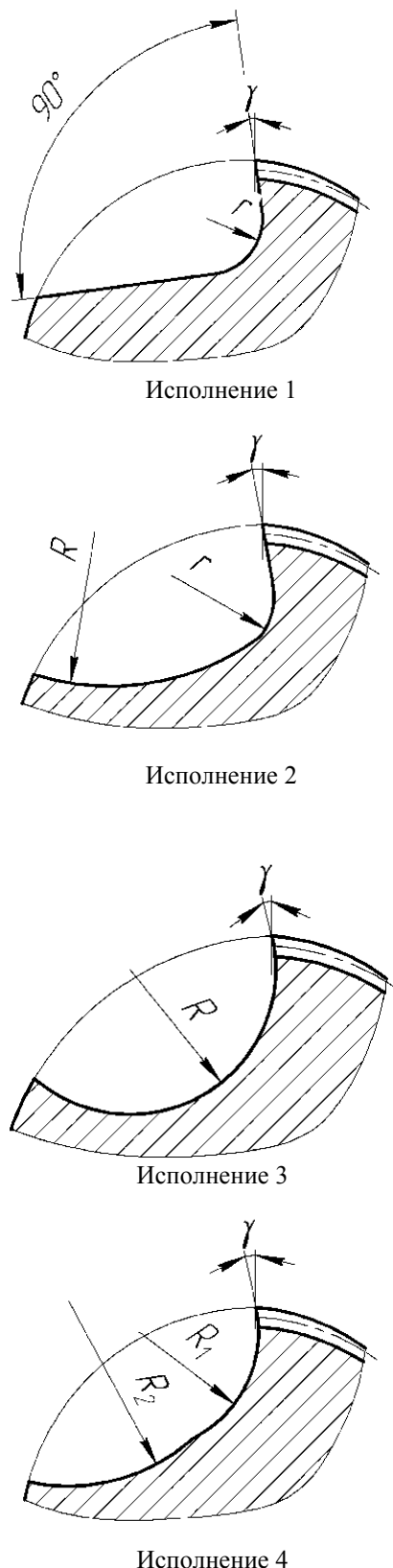


Рис. 1. Виды профилей поперечных сечений стружечных канавок

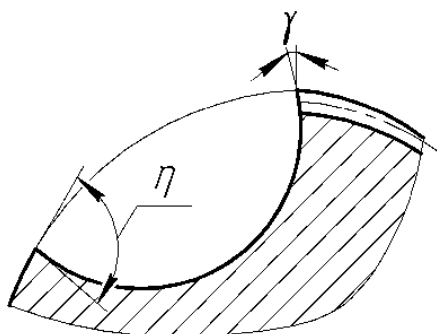


Рис. 2. Профиль стружечной канавки метчика с углом η

На основании вышеприведенного анализа, сформулируем ряд требований к профилю стружечной канавки:

а) значение угла η должно стремиться к 90° ;

б) профиль канавки должен быть простой геометрической формы, что уменьшает проблемы, возникающие при изготовлении метчика.

Наиболее полно выдвинутым требованиям удовлетворяет профиль, представленный на (рис. 1), исполнение 3 – радиусный профиль.

Однако, в соответствии с ранее выдвинутым условием для обеспечения постоянства угла γ на передней поверхности зуба метчика по всей длине заборного конуса, стружечная канавка должна обладать плоской поверхностью. Аналогичное требование относится и к обратной стороне стружечной канавки, которая должна обеспечить угол η – угол обратного резания. Таким образом, профиль стружечной канавки должен представлять радиусную кривую, переходящую в отрезок прямой у вершины зубьев (рис. 3).

Длины l_γ и l_η предлагается выполнять одной величины, исходя из следующих соотношений с высотой зуба h_i

$$l_\gamma = l_\eta = 2h_i. \quad (1)$$

Значение радиуса R стружечной канавки зависит как от расстояния между смежными зубами метчика, так и от площади стружечной канавки ($S_{стр.кан.}$). В общем случае площадь $S_{стр.кан.}$ выражается как

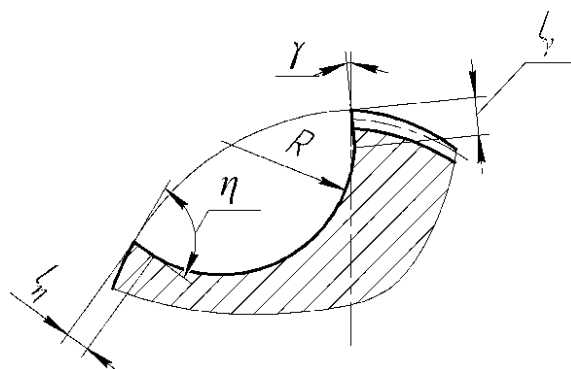


Рис. 3. Рекомендованная форма стружечной канавки для деформирующе-режущих метчиков типоразмеров М3...М6

$$S_{стр.кан.} = \int_a^b (f_1(x) - f_2(x)) dx, \quad (2)$$

где $f_1(x)$, $f_2(x)$ – функции, описывающие профиль сечения заборного конуса и профиль стружечной канавки соответственно; a_s , b_s – границы интегрирования (точки пересечения образующих $f_1(x)$ и $f_2(x)$).

В декартовой системе координат (рис. 4) функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ описываются зависимостями:

$$\begin{cases} f_1(x) = \sqrt{r^2 - x^2}; \\ f_2(x) = \sqrt{R^2 - (x - R \cos \gamma)^2} - r + R \sin \gamma, \end{cases} \quad (3)$$

где x – переменная; R и r соответственно радиусы стружечной канавки и заборного конуса в сечении рассматриваемого зуба.

Границы интегрирования a , b равны:

$$a = \frac{2Rr \cos \gamma (R \sin \gamma - r)}{2Rr \sin \gamma - R^2 - r^2}; \quad b = 0. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) выражение (2) примет вид

$$S_{стр.кан.} = \int_a^0 \left(\sqrt{r^2 - x^2} - \sqrt{R^2 - (x - R \cos \gamma)^2} - r + R \sin \gamma \right) dx.$$

При наличии значения площади стружечной канавки $S_{стр.кан.}$, решение последнего уравнения дает значение искомого радиуса стружечной канавки R .

Значение площади стружечной канавки $S_{стр.кан.}$ определяется из условия неравенства пропускной способности стружечной канав-

ки и производительности стружкообразования [15]:

$$Q_{стр.кан.} \geq Q_{рез.}, \quad (5)$$

где $Q_{стр.кан.}$ – пропускная способность стружечной канавки, $Q_{стр.кан.} = V_z k S_{стр.кан.i}$; $Q_{рез.}$ – производительность стружкообразования, $Q_{рез.} = S_{ср.i} V$.

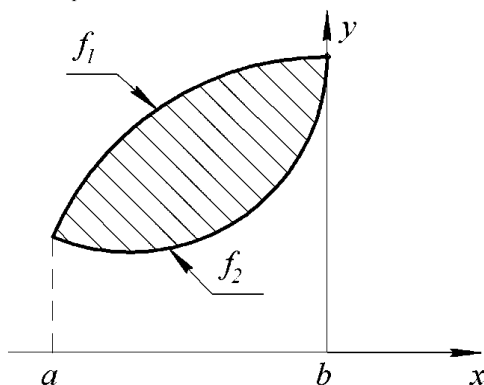


Рис. 4. Представление площади стружечной канавки в декартовой системе координат

Площадь стружечной канавки определяется:

$$S_{стр.кан.i} = \frac{S_{ср.i} V}{V_z k}, \quad (6)$$

где $S_{ср.i}$ – площадь среза материала i -м режущим зубом метчика; V – скорость рабочего движения инструмента; V_z – скорость осевого перемещения стружки; k – коэффициент заполнения стружечной канавки.

Скорость V_z определяется из решения уравнения Лагранжа второго рода [15]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = P, \quad (7)$$

где T – кинетическая энергия частицы стружки в плоскости вектора скорости V_z , $T = \frac{G V_z^2}{2g}$; P – обобщенная сила в плоскости вектора скорости V_z ; φ – обобщенная координата.

Скорость V_z перемещения стружки:

$$V_z = r \left[\frac{n_0 \pi}{30} - \sqrt{\frac{g}{r} \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\tan \varphi_c} (ctg \lambda + tg \varphi_k (1 + ctg^2 \lambda)) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right)} \right],$$

где n_0 – частота вращения метчика; φ_k и φ_c – углы трения стружки о поверхность стружечной канавки и обрабатываемого отверстия.

Выводы

Предложенная форма стружечной канавки и математические модели определения ее размеров могут быть применены не только при проектировании деформирующе-режущих метчиков, но и традиционных режущих инструментов – сверл, зенкеров, разверток и метчиков.

Список литературы

1. Филиппов Г.В. Режущий инструмент/ Г.В. Филиппов. – Л.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
2. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов: Учеб. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / Под общ. ред. Г.Н. Кирсанова – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
3. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. Учеб. пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / Г.Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Киреев Г.И. Проектирование метчиков и круглых плашек: учебное пособие/ Г.И. Киреев. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 107 с.
5. Древаль А.Е. Расчет и конструирование метчиков: Учебное пособие по курсу «Режущий инструмент» / А.Е. Древаль. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1979. – 31 с.
6. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб/ В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
7. Грудов А.А. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент/ А.А. Грудов, П.Н. Комаров – М.: НИИМАШ, 1980. – 62 с.
8. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб/ В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
9. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики/ В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середя – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.

10. Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А. Метчик// Патент Украины на полезную модель № 64950. 2011 г. Бюл. №22/2011
11. Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А. Способ изготовления метчика// Патент Украины на полезную модель № 64951. 2011 г. Бюл. №22/2011
12. Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Новиков П.А. Метчик// Патент Украины на полезную модель № 66082. 2011 г. Бюл. №24/2011
13. Новиков П.А. Підвищення точності внутрішніх різьб (М3...М6) та продуктивності їх формоутворення в деталях з алюмінієвих сплавів/ П.А. Новиков, Ф.М. Канареев, О.О. Харченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки. – Житомир, 2012. – Вип. № 1(60) – С. 14 – 20
14. Мирнов И.Я. Затывование режущей части метчиков для нарезания точных резьб/ И.Я. Мирнов, О.А. Анпилогов// СТИН – 1984. – №4. – С.18 – 19.
15. Малишко І.О. Вплив конструктивних параметрів осевих комбінованих інструментів на продуктивність/ І.О. Малишко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Машинобудування і машинознавство. – ДонНТУ, 2004, – С63 – 69.
4. Kireev G.I. Proektirovanie metchikov i kruglykh plashek: uchebnoe posobie/ G.I. Kireev. – Ul'ianovsk: UIGTU, 2008. – 107 s.
5. Dreval' A.E. Raschet i konstruirovaniye met-chikov: Uchebnoe posobie po kursu «Rezhushchii instrument»/ A.E. Dreval'. - M.: Izd-vo MVTU im. N.E. Bauman, 1979. – 31s
6. Matveev V.V. Narezanie tochnykh rez'b/ V.V. Matveev. – M: Mashinostroenie, 1978. – 88 s.
7. Grudov A.A. Vysokoproizvoditel'nyi rez'-boobrazuiushchii instrument/ A.A. Grudov, P.N. Koma-rov - M.: NIIMASh, 1980. – 62 s.
8. Iakukhin V.G. Optimal'naia tekhnologiya izgotovleniya rez'b/ V.G. Iakukhin. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 184 s.
9. Men'shakov V.M. Besstruzhechnye metchiki/ V.M. Men'shakov, G.P. Uralpov, V.S. Sereda – M.: Mashinostroenie, 1976. – 167 s.
10. Kanareev F.N., Kharchenko A.O., Novikov P.A. Metchik// Patent Ukrainy na poleznuiu model' № 64950. 2011 g. Biul. №22/2011.
11. Kanareev F.N., Kharchenko A.O., Novikov P.A. Spособ izgotovleniya metchika// Patent Ukrainy na poleznuiu model' № 64951. 2011 g. Biul. №22/2011
12. Kanareev F.N., Kharchenko A.O., Novikov P.A. Metchik// Patent Ukrainy na poleznuiu model' № 66082. 2011 g. Biul. №24/2011.
13. Novikov P.A. Pidvishchennia tochnosti vnutrishnikh riz'b (M3...M6) ta produktivnosti ikh formoutvorenna v detaliakh z aliuminievykh splaviv/ P.A. Novikov, F.M. Kanareev, O.O. Kharchenko // Visnik Zhitomir's'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: tekhnichni nauki. – Zhitomir, 2012. – Vip. № 1(60) – S. 14 – 20.
14. Mirnov I.Ia. Zatylovanie rezhushchei chasti metchikov dlia narezaniia tochnykh rez'b/ I.Ia. Mirnov, O.A. Anpilogov// STIN – 1984. – №4. – S.18 – 19.
15. Malishko I.O. Vpliv konstruktivnykh parametriv os'ovikh kombinovanykh instrumentiv na produktivnist'/ I.O. Malishko // Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Ser. Mashinobuduvannia i mashinoznavstvo. – DonNTU, 2004, – S63 – 69.

References

УДК 628.165

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ ДЛЯ КРЫМСКОГО РЕГИОНА

Г.А. Сигора¹, Л.А. Ничкова¹, Т.Ю. Хоменко¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Из всех субъектов РФ Крым наименее обеспечен пресной водой. Так как Крым омывается Черным и Азовским морями, эта географическая особенность региона позволяет широко применять методы опреснения морской воды. Существует большое количество методов опреснения морской воды, среди них: дистилляция, вымораживание, ионный обмен, электролиз, электродиализ, обратный осмос, газогидратная экстракция, биологические методы опреснения и другие. Предложены критерии для выбора оптимального способа опреснения воды в Крымском регионе - «изученность и достоверность», «географический», «промышленное применение», «экономический», «расход электроэнергии», «экологическая безопасность» и другие. На основании этих критериев проведен выбор из 12 альтернатив. Выяснено, что наиболее подходящий метод опреснения – вакуумная дистилляция.

Ключевые слова: опреснение, дистилляция, обратный осмос, Крым, критерии выбора.

THE CHOICE OF THE OPTIMAL DESALINATION SYSTEMS OF SEA WATER FOR THE CRIMEAN REGION

G.A. Sigora¹, L.A. Nichkova¹, T.Y. Khomenko¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

From all Territorial subjects of the Russian Federation of Crimea it is least provided with fresh water. As the Crimea is washed Black and Azov by the seas, this geographical feature of the region allows to apply methods of desalting of sea water widely. There is a large number of methods of desalting of sea water, among them: distillation, vymorazhivaniye, ionic exchange, electrolysis, electrodialysis, return osmosis, gaseous-hydrate extraction, biological methods of desalting and others. Criteria for the choice of an optimum way of desalting of water in the Crimean region – «study and reliability», «geographical», «industrial application», «economic», «an electric power expense», «ecological safety» and others are offered. On the basis of these criteria the choice from 12 alternatives is carried out. It is found out that the most suitable method of desalting – vacuum distillation.

Keywords: desalting, distillation, return osmosis, Crimea, criteria of the choice.

По данным ООН от дефицита воды страдает более 40% мирового населения, и эта цифра постоянно растет. По оценкам экспертов, доступа к чистой воде лишены 783 миллиона жителей планеты и более 1,7 миллиарда человек, проживающих на территории речных бассейнов, нуждаются в дополнительных источниках пресной воды [1].

Вода обеспечивает три важнейшие для человечества функции: 1) производство продовольствия, 2) производство энергии и промышленной продукции, 3) бытовое водопотребление и удовлетворение санитарно-гигиенических потребностей. Неудивительно, что беспрецедентный рост мировой эко-

номики в XX в., демографический взрыв, сопутствующее этому увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы и природные водные объекты, стали причиной возникновения дефицита воды во многих регионах мира. Конечно, с нехваткой воды человечество знакомо едва ли не с момента своего возникновения, но ее сегодняшние масштабы совершенно беспрецедентны [2].

От всех мировых запасов пресная вода составляет 35%, которая может быть использована населением в быту. Из этих запасов: 70% – это ледники, недоступные для использования, 29% – воды подземных источников и лишь 1% – воды, которые до-

ступны для использования населением планеты. Стоит заметить, что этот 1% доступной пресной воды распределен на нашей планете неравномерно.

Как ожидается, к 2030 году 47% мирового населения будут жить в условиях острого дефицита воды. Обеспечение пресной водой будет одним из приоритетных направлений деятельности для многих стран [3]. Для снижения рисков и удовлетворения будущих потребностей, существует настоятельная необходимость в создании устойчивой водной инфраструктуры и улучшение управления водными ресурсами в городах и неформальных поселениях. За последние 50 лет водозабор увеличился в три раза, что повлекло за собой нехватку питьевой воды и истощение грунтовых вод.

Эксперты ООН сошлись во мнении, что вода стала более важным стратегическим ресурсом, чем даже нефть или газ. В период всемирной глобализации такие ресурсы как чистая вода, воздух, почва могут превратиться в исчерпаемые природные ресурсы. Этого развития событий допустить ни в коем случае нельзя. Можно уверенно сказать, что вода является одним из наиболее стратегически важных ресурсов. В связи с нестабильной военной глобальной ситуацией в мире многие перспективные проекты по ирригации, обеспечении и внедрении новых технологий потерпели фиаско из-за гражданских войн и военных конфликтов. Занесенный в книгу рекордов Гиннеса ирригационный проект «Великая рукотворная река» в Ливии тому подтверждение. Данный проект обещал напоить и обеспечить всю Африку водой и не зависеть от «водных» поставщиков Запада. Этот проект не был осуществлен из-за боевых действий, которые развернулись в Ливии. Похожий пример постиг недостроенный канал «Белый Нил» в Судане и Египте. Недосток воды самый опасный грядущий глобальный риск.

Россия одна из немногих стран мира имеет наибольшие запасы пресных вод. Это говорит об особенной ответственности за водный пресный запас в целом. В стратегии национальной безопасности Российской Федерации отмечено, что на состояние эколо-

гической безопасности негативное влияние оказывают истощение запасов минерально-сырьевых, водных и биологических ресурсов [4].

Из всех субъектов РФ Крым наименее обеспечен пресной водой. До 2014 года вода из Днестра, поступающая по Северо-Крымскому каналу обеспечивала около 84 % всех нужд водопотребления. Больше половины территории Крыма составляют пустынные степи. На севере Крыма, где канал был единственным источником водоснабжения, существует угроза деградации почв. По мнению некоторых геологов, солончаковые почвы Крыма на протяжении десятков лет насыщались водой из Северо-Крымского канала по миллиарду тонн воды в год, без должного орошения эти почвы могут снова прийти в негодное для сельскохозяйственных целей состояние, а то и вовсе деградировать. Ведение сельского хозяйства, промышленность Крыма стоит под угрозой в целом.

До 2020 года в Крыму должен вступить в строй водовод из подземных источников. Бурение скважин может привести к процессам понижения уровня грунтовых вод, часть слоев почвы моментально подвергнется засолению. В середине двадцатого века, когда подземные воды активно использовались в Крыму без Северо-Крымского канала, наступил момент, когда запасы таких вод практически истощились. Тогда это привело к масштабному появлению солончаковых пятен. Именно это подвигло власти построить Северо-Крымский канал.

На сегодняшний день необходимо искать альтернативные пути решения. Необходимо найти способ пополнения пресной воды. Так как Крым омывается Черным и Азовским морями, эта географическая особенность региона позволяет широко применять методы опреснения морской воды.

Существует большое количество методов опреснения морской воды, среди них: дистилляция, вымораживание, гелиоопреснение, ионный обмен, осаждение солей с помощью реагентов, электролиз, электродиализ, обратный осмос, экстракция органическими растворителями, газогидратная экс-

3. Критерий «промышленное применение». Объемы получаемой пресной воды для решения поставленной задачи необходимы

Используя эти критерии ограничения, создадим модель системы «оптимальный метод опреснения морских вод» (рис. 1).

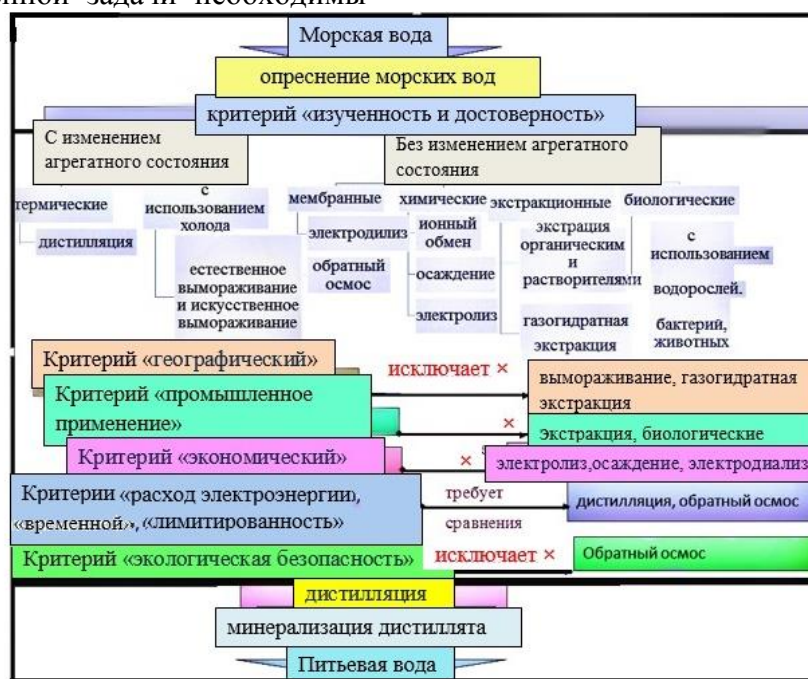


Рис. 1. Система «оптимальный метод опреснения морских вод»

Обладая всеми преимуществами контактного вымораживания, газогидратный метод тоже исключается, так как в его принципиальной основе есть вымораживание.

Критерий «промышленное применение» исключает экстракцию и метод биологического опреснения морских вод.

Критерий «экономический» исключает сразу ряд методов опреснения с применением реагентов. Так как:

- в методе химического осаждения используются дорогостоящие реагенты;
- реакция осаждения с солями бария протекает медленно, так же соли бария токсичны (критерий «экологическая безопасность» тоже исключает данный метод);
- для каждой отдельной из растворенных солей в морской воде требуется подбор определенных реагентов;
- как правило, реагенты не поддаются регенерации, что удорожает этот метод опреснения.

Поэтому химическое осаждение при опреснении воды используется очень редко.

Метод электродиализа предполагает использования дорогостоящих мембран, а для опреснения можно использовать воду с солесодержанием не более 10 000 мг/л, (средняя соленость Черного моря – 17 000 мг/л).

В методе ионного обмена мембраны оказываются весьма чувствительными к малейшим отложениям накипи, особенно гидроокиси магния, которая выпадает даже при низких температурах вследствие повышения концентрации ионов у поверхности мембран в рассольных камерах. Вирусы и бактерии, которые не чувствительны к электрическому полю останутся в воде, поэтому критерий «экологическая безопасность» тоже не пропустил бы данный метод.

Для рассмотрения остаются два наиболее применяемых методов опреснения – дистилляции и обратного осмоса.

Сравним эти методы по критериям «лимитированность», «временной» и «расход электроэнергии».

Достоинства обратного осмоса [7]:

- высокое качество воды по взвесям, биологическим и органическим загрязнениям;
- минимальное количество реагентов и суммарного сброса солей в окружающую среду;

- возможность сброса концентрата без обработки в канализацию;

- относительно низкие эксплуатационные затраты;

- отсутствие агрессивных реагентов и необходимости их обработки.

Недостатки обратного осмоса:

- организация сложной технологии предварительной очистки исходной воды, стоимость которой иногда в два-три раза превышает стоимость самой установки обратного осмоса и наличие которой удваивает энергопотребление;

- требует большого количества химических реагентов, что снижает экологическую составляющую процесса опреснения воды;

- реальный срок службы мембран составляет порой три – четыре года;

- желательность непрерывной работы обратноосмотической установки;

- метод обратного осмоса влечет за собой высокую зависимость от производителей мембран. Здесь уместно упомянуть, что мировой лидер в производстве мембран – США.

Достоинства метода дистилляции:

- минимальное количество используемых химических реагентов и минимальный сброс солей в окружающую среду;

- низкие эксплуатационные расходы;

- большой срок службы – около 20 лет;

- термический метод позволяет обессолить воду практически с любыми видами загрязнений и с любым солесодержанием;

- высокое качество воды по взвесям;

- возможность получения отходов минимального объема, вплоть до сухих солей;

- возможность использования избыточного тепла;

- удаление из воды растворенных газов.

Недостатки дистилляции:

- высокие удельные капитальные затраты;

- значительное удельное энергопотребление. Поэтому экономически целесообразно строить эти установки при наличии дешевого источника тепла, например, на площадках, действующих или строящихся тепловых и атомных электростанций.

В (табл. 1) приведено [7] оценочное сравнение методов обессоливания воды по трем уровням: минимальный – Мин, максимальный – Макс и средний – Ср.

Таблица 1 – Оценочное сравнение методов обессоливания по [7]

Параметр	Обратный осмос	Дистилляция
Надежность	Ср	Макс
Степень обессоливания	Ср	Ср
Удаление органики	Макс	Ср
Удавление микрофлоры	Макс	Макс
Удаление взвесей	Макс	Макс
Удаление растворенных газов	Мин	Макс
Требования к подготовке	Макс	Ср
Энергозатраты	Макс	Макс
Расход реагентов	Мин	Мин
Расход питающей воды	Макс	Мин
Объём отходов	Макс	Мин
Возможность переработки отходов	Мин	Макс
Возможность сброса отходов	Макс	Мин

Из (табл. 1) следует, что технологии объединяет одно: процесс опреснения требует большого количества энергии. Электричество необходимо и установкам обратного осмоса и дистилляционным опреснительным установкам (ДООУ).

Сейчас в мире для опреснения в основном используются либо теплогенерация (ТЭС или ТЭЦ с комбинированной выработкой электричества и тепла), либо «обезличенная» электроэнергия из сети, либо даже возобновляемые источники энергии.

Критерий «экологическая безопасность», учитывающий физико-химические свойства воды после опреснения морской воды является, вероятно, наиболее важным итоговым критерием при выборе метода опреснения для Крымского региона. Пресная вода, полученная практически любым методом опреснения, для использования ее в питьевых целях нуждается в коррекции состава. Помимо общепринятых критериев оценки качества питьевой воды в соответствии с ГОСТ Р 51232-98 «Вода питьевая.

Общие требования к организации и методам контроля качества» [8] – благоприятных органолептических свойств, безвредности химического состава и безопасности в эпидемиологическом (инфекционном) отношении, для опресненной воды определены дополнительные критерии – физиологическая полноценность и стабильность качества [9].

С 1 января 2002 года в России введен в действие нормативный правовой акт – Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения» [10]. В основе гигиенических требований к качеству воды для питьевых и бытовых нужд лежит принцип безопасности в эпидемиологическом отношении, безвредности по химическому составу и благоприятности по органолептическим свойствам.

Дистилляция – процесс, почти аналогичный происходящему в природе. В результате дистилляции можно получить обессоленную воду, очищенную от всех вредных солевых элементов. Это удастся сделать и методом обратного осмоса. Однако вода, получаемая в результате очистки этими способами, разного качества. Рассмотрим качество опресненной воды двумя методами по трем показателям – содержание бора, брома и дейтерия.

В работе [11] приведены некоторые данные о разделении биологически активных микроэлементов (бора и брома) при различных методах опреснения минерализованной воды. При содержании в исходной минерализованной воде 2-4 мг/л бора в экспериментальных условиях дистилляции бор задерживается на 100% независимо от температуры испарения (70-100°C); при содержании в исходной воде 3-6 мг/л брома в экспериментальных условиях бром задерживается на 90-95%, при этом эффект задержания снижается при снижении температуры кипения в вакууме. При обратноосмотическом опреснении воды эффективность задержания бора и брома практически не зависит от вида

ацетатцеллюлозных мембран (МГА, МОО), режима эксплуатации установки и уровня исходного содержания и находится на уровне 30-35% по бору и 70-80% по бром.

При электродиализном опреснении воды эффективность задержания бора и брома зависит от глубины опреснения. При опреснении воды до остаточного солесодержания 600-700 мг/л эффективность задержания составляет по бору 40% и по бром 60%, а до 300 мг/л – соответственно 70-80% и более 95%. Общая закономерность задержания микроэлементов в зависимости от метода опреснения воды характеризуется убывающим рядом; для бора – дистилляция > электродиализ = обратный осмос; для брома – дистилляция > обратный осмос > электродиализ.

Необходимо подчеркнуть, что при выборе метода опреснения воды следует уделять внимание наличию в морской воде «тяжелой воды». «Тяжелая вода» играет значительную роль в различных биологических процессах. Различными исследованиями [12-15] установлено, что «тяжелая вода» действует отрицательно на живые организмы.

Содержание тяжелых изотопов водорода и кислорода в природных водах контролируется двумя международными стандартами:

Стандарт SMOW (Standard Mean Ocean Water) соответствует глубинной воде Мирового океана, которая весьма стабильна по изотопному составу, с содержанием лёгкого изотополога $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, равным 997,0325 г/кг (99,73 мол. %).

Стандарт SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation) соответствует природной воде из Антарктики, в которой доля самого лёгкого изотополога составляет 997,3179 г/кг (99,76 мол.%) [16].

В (табл. 2) представлены изотопные определения образцов воды, включающей образец Международного стандарта стабильных изотопов. Международный стандарт стабильных изотопов – это средняя проба воды Мирового океана, принятая повсеместно в качестве нулевого отсчета.

Таблица 2 – Содержание дейтерия и кислорода-18 в образцах из разных источников

	Международный стандарт стабильных изотопов воды. МАГАТЭ	Озеро Байкал	Черное море, г. Сочи, гл.100 м	Городской водопровод, г. Москва	Средиземное море, Израиль, р-н г. Ашкелон	Опресненная вода после установки, Израиль г. Ашкелон
$\delta D, \text{‰}$ SMOW	0,00	-118	-30	-90	+5	+6
$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$ SMOW	0,00	-15,7	-4,0	-7,0	+0,8	-4,7

Для сравнительного анализа привлечены образцы данных из озера Байкал, Черного моря, воды городского водопровода города Москвы, Средиземного моря, воды после опреснительной установки обратного осмоса города Ашкелона (Израиль) [17].

Как видно из (табл. 2) содержание дейтерия в Средиземном море значительно выше, чем в Черном море. При прохождении морской воды через установку обратного осмоса концентрация дейтерия не снижается. Изотопы, находившиеся в исходной воде, не отфильтровываются, а целиком пропускаются в опреснённую воду, ряд высокотоксичных и радиоактивных примесей воды также не задерживается фильтрами и полностью, частично или в составе соединений, новообразовавшихся при продавлировании воды через фильтры, также попадает в опреснённую воду.

Недостатки метода опреснения обратным осмосом с учетом критерия ограничения «экологическая безопасность» [15]:

- не удаляет тяжелые стабильные изотопы;
- возможность удаления брома и бора имеет определенные ограничения – например, содержание бора в опресненной воде по сравнению с исходной морской нужно уменьшить на порядок для достижения нормативной величины – не более 0,5 мг/л, а это для мембранных методов представляет определенные трудности, при дистилляции таких трудностей нет;
- мембранные методы предполагают использование в больших количествах различных синтетических и полимерных материалов. Целлюлозные, полиамидные и иного типа мембраны имеют два гигиенически важных свойства. Во-первых, незаполими-

зировавшиеся мономеры могут вымываться из этих полимерных материалов и поступать в опресненную воду. Во-вторых, со временем, под воздействием различных факторов окружающей среды, может происходить трансформация полимерных материалов с образованием побочных продуктов органического происхождения.

Преимущества дистилляции:

- в дистилляционных методах опреснения полимерные материалы практически не используются, и угрозы загрязнения веществами искусственного происхождения практически не существует;

- на вакуумно-дистилляционных опреснительных установках поступление «тяжелой воды» в дистиллят исключается в принципе, поскольку температура кипения тяжелой воды во всём диапазоне давлений на несколько градусов больше, чем температура кипения «тяжелой воды», при дистилляции происходит изменение структуры воды и удаляются тяжелые стабильные изотопы.

Таким образом, по предложенным критериям ограничения наиболее всего для пополнения пресной водой нужд Крыма подходит дистилляционный метод опреснения морской воды вакуумными адиабатными установками.

Решение о масштабном строительстве опреснительных станций в Крыму необходимо принимать после всех необходимых исследований и точного понимания того, что, во-первых, пресная вода, полученная практически любым методом опреснения, для использования ее в питьевых целях нуждается в коррекции солевого состава, а во-вторых, что делать с рассолами, которые остаются в результате опреснения.

Существуют и отечественные разработки, и мировой опыт в решении этих двух проблем. Какие именно из этих решений наиболее подходят для Крымского региона тема наших дальнейших исследований.

Список литературы

1. Организация объединенных наций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.un.org/ru/sections/issues-depth/water/index.html> (дата обращения 10.08.17).

2. Данилов-Данильян В. И. Потребление воды: эколог., экон., соц. и полит. аспекты / В.И. Данилов-Данильян, К.С. Лосев; Ин-т водных проблем РАН. - М.: Наука, 2006. - 221 с.
3. Water and Green Growth Vol 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.worldwatercouncil.org/ru/biblioteka/thematic-heskie-izdaniya/> (дата обращения 10.08.17).
4. Указ Президента Российской Федерации от 31.12.2015 № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации»// Собрание законодательства Российской Федерации 2016. № 1 (часть II), ст. 212.
5. Слесаренко В.Н. Опреснительные установки. / В.Н. Слесаренко. - Владивосток: ДВГМА, 1999. - 244 с.
6. Панасюк Е.С. Поиск наиболее оптимального метода опреснения морских вод / Е.С. Панасюк, Г.А. Сигора // 2-я всероссийская конференция «Техносфера XXI века»: материалы всероссийской конференции молодых ученых. - Севастополь, 17 – 20 апреля 2017 г. – С.118-120.
7. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б.Е. Рябчиков. - М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
8. ГОСТ 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. – Введ. 1999-01-07. М.: Изд-во стандартов, 1999. – 3-8 с.
9. Методические указания по санитарному контролю за применением и эксплуатацией дистилляционных опреснительных установок. – М.: Минздрав СССР, 1998. - 6-17 с.
10. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – Введ. 2002-01-01. М.: Минздрав России, – 8 с.
11. Егоров А.И. Приготовление искусственной питьевой воды / А.И. Егоров. – М.: Стройиздат, 1988. – 112 с. ил.
12. Торопцев И.В. Биологическая роль тяжелой воды в живых организмах. / И.В. Торопцев, Б.Н. Родимов, А.М. Маршунина, И.О. Яфарова, В.И. Садовникова, И.Г. Лобина // Вопросы радиобиологии и гематологии. – Томск: Изд. Томского университета, 1966. - 118-126 с.
13. Мосин О.В. Изотопные эффекты дейтерия в клетках бактерий и микроводорослей при росте на тяжелой воде (D₂O) / О.В. Мосин, И.А. Игнатов // Вода: химия и экология, 2012. №3. - С. 83-94.
14. Лобышев В.И. Аномальное активирующее влияние тяжелой воды малой концентрации на регенерацию гидроидных полипов / В.И. Лобышев // Биофизика, 1983. N4. - С. 666-668.
15. Денько Е.И. Влияние тяжелой воды D₂O на клетки животных, растений и микроорганизмы / Е.И. Денько // Успехи совр. биол., 1970. т. 20. - № 1 (4). - С. 41 - 85.

16. Ферронский В. И. Изотопия гидросферы / В.И. Ферронский, В.А. Поляков // Научный мир. – М.: 2009. – 617 с.
17. Ещё раз о качестве питьевой воды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.moscowuniversityclub.ru/home.asp?artId=15362> (дата обращения 10.08.17)
18. Ядерное опреснение: не пресный план Росатома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://atomicexpert-old.com/content/yadernoe-opresnenie-ne-presnyy-plan-rosatoma> (дата обращения 10.08.17)

References

1. United Nations [An electronic resource]. – Access mode: <http://www.un.org/ru/sections/issues-depth/water/index.html> (date of the address 10.08.17).
2. Danilov-Danilyan, V.I. Water consumption: ecologist., economic, social also it is watered. aspects / V.I. Danilov-Danilyan, K.S. Losev; Ying t of water problems of RAS. - M.: Science, 2006. - 221 pages.
3. Water and Green Growth Vol 1 [An electronic resource]. – Access mode: <http://www.worldwatercouncil.org/ru/biblioteka/tematicheskie-izdaniya/> (date of the address 10.08.17).
4. The decree of the President of the Russian Federation from 12/31/2015 No. 683 "About the Strategy of national security of the Russian Federation"// the Russian Federation Code of 2016. No. 1 (part II), Art. 212.
5. Slesarenko V.N. Desalination installations. / V.N. Slesarenko. - Vladivostok: DVGMA, 1999. - 244 pages.
6. Panasyuk E.S. Search of the most optimum method of desalting of sea waters / E.S. Panasyuk, G.A. Sigora // 2nd All-Russian conference "Technosphere of the 21st Century": materials of the All-Russian conference of young scientists. - Sevastopol, on April 17 - 20, 2017 – Page 118-120.
7. Ryabchikov B.E. Modern methods of preparation of water for industrial and household use / B.E. Ryabchikov. - M.: Have put a print, 2004. – 328 pages.
8. Drinking GOST 2874-82 Water. Hygienic requirements and control of quality. – Vved. 1999-01-07. M.: Publishing house of standards, 1999. – 3-8 pages.
9. Methodical instructions on sanitary control of application and operation of distillation desalination installations. – M.: Ministry of Health of СССР, 1998. - 6-17 pages.
10. SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements to quality of water of the centralized systems of drinking water supply. Quality control. – Vved. 2002-01-01. M.: The Russian Ministry of Health, – 8 with.
11. Egorov A.I. Preparation of artificial drinking water / A.I. Egorov. – M.: Stroyizdat, 1988. – 112 pages silt.
12. Toroptsev I.V. A biological role of heavy water in live organisms. / I.V. Toroptsev, B.N. Ro-dimov, A.M. Marshunina, I.O. Yafarova, V.I. Sadovnikova, I.G. Lobin // Questions of radiobiology and hematology. – Tomsk: Prod. Tomsk un-that, 1966. - 118-126 pages.
13. Mosin O.V. Isotope effects of a deuterium in cages of bacteria and microseaweed with a growth on heavy water (D2O) / O.V. Mosin, I.A. Ignatov // Water: chemistry and ecology, 2012. No. 3. - C. 83-94.
14. Lobyshev V.I. The abnormal activating influence of heavy water of small concentration on regeneration the gidroidnykh of polyps / V.I. Lobyshev // Biophysics, 1983. N4. - Page 666-668.
15. Denko E.I. Influence of heavy D2O water on cages of animals, plants and microorganisms / E.I. Denko // Progress совр. биол., 1970. t. 20. - No. 1 (4). - Page 41 - 85.
16. Ferronsky V.I. Hydrosphere isotopy / V.I. Ferronsky, V.A. Polyakov//Scientific world. – M.: 2009. - 617 with.
17. Once again about quality of drinking water. [An electronic resource]. – Access mode: <http://www.moscowuniversityclub.ru/home.asp?artId=15362> (date of the address 10.08.17).
18. Nuclear desalting: not the fresh plan of Rosatom [An electronic resource]. – Access mode: <http://atomicexpert-old.com/content/yadernoe-opresnenie-ne-presnyy-plan-rosatoma> (date of the address 10.08.17).

УДК 621.923:621.90.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Н.Н. Столяров¹, А.В. Мерзлов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Рассматриваются проблемы моделирования износа абразивного инструмента. Получена стохастическая нестационарная математическая модель, описывающая износ абразивного инструмента. Уравнения износа носят функциональный характер и позволяют рассчитать его для различных режимов шлифования. С целью автоматизации прогнозирования параметров состояния рабочей поверхности абразивного инструмента разработан алгоритм. Применение такого подхода позволяет строить высокопроизводительные циклы управления операцией шлифования с коррекцией состояния инструмента при проектировании технологических процессов изготовления деталей на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: износ, абразивный инструмент, шлифование, глубина резания.

MODELING OF WEAR OF THE ABRASIVE TOOL TO SOLVE THE PROBLEM OF CORRECTING THE MANAGEMENT CYCLE OF FINE GRINDING OPERATION

N.N. Stolyarov¹, A.V. Merzlov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Considers the problem of modeling the wear of the abrasive tool. The obtained stochastic non-stationary mathematical model describing the wear of the abrasive tool. The wear equations are functional in nature and allow us to calculate it for different grinding regimes. To automate forecasting of state parameters of the working surface of the abrasive tool an algorithm is developed. This approach allows you to build high-performance cycles and management of the operation of grinding with the state correction tool for design of technological processes of manufacturing parts on CNC machines.

Keywords: wear, abrasive tool, grinding, cutting depth.

Введение

Современные автоматизированные системы имеют ряд новых возможностей, использование которых позволяет существенно повысить эффективность их внедрения.

При обработке материалов резанием, с внедрением автоматизированных систем, становится реально разрешимой задача управления оборудованием с подстройкой системы к изменяющимся свойствам технологической среды [1-3].

Особенно актуальна эта задача для операций чистового и тонкого шлифования. Особенностью этих операций является

наличие нестабильного звена, которым является шлифовальный круг. За период стойкости такого инструмента изменяются форма режущих кромок, их число и распределение на рабочей поверхности, что сказывается на выходных показателях процесса [4,5].

С целью обеспечения заданного качества циклы шлифования настраиваются на наихудшие условия обработки, при этом возможности инструмента используются не полностью.

В связи с этим целесообразно осуществлять корректировку циклов с учетом износа рабочей поверхности инструмента.

Моделирование износа абразивного инструмента

В качестве исходной модели износа абразивного инструмента примем модель, предложенную в работе [6]. Приращение износа вершины абразивного зерна h_{3u} , расположенного на расстоянии u – от вершины наиболее выступающего зерна до рассматриваемого уровня абразивного инструмента по глубине, при i -м контакте инструмента с материалом за время $d\tau$ вычислим по зависимости:

$$dh_{3u} = h_0 \cdot P_k \cdot V_k \cdot d\tau, \quad (1)$$

где h_0 – величина относительного износа материала зерна; P_k – вероятность контакта вершины зерна с материалом в данной точке зоны контакта, численно равная вероятности не удаления материала.

Для установившегося процесса шлифования при частных значениях коэффициентов $\chi=1.5$ и $m=0.5$ вероятность не удаления материала вычисляется по зависимости:

$$P(\bar{M}) = \exp \left\{ - \frac{\pi k_c n_3 (V_k \pm V_u) \sqrt{2\rho_3}}{V_u H_u^{3/2}} \times \right. \\ \times \left[\frac{2}{5} \sqrt{D_9} \times \sum (t_{tm} - y_i - i\Delta r)^{5/2} + \right. \\ \left. + \frac{3}{8} (t_{tm} - y_i - \Delta r)^2 \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right] \left. \right\}$$

где K_c – коэффициент стружкообразования; D_9 – эквивалентный диаметр:

$$D_9 = \frac{D \cdot d}{D + d} \quad (D \text{ и } d - \text{ диаметры круга и заготовки; } y_i - \text{ расстояние от поверхности, ограничивающей слой исходной шероховатости со стороны среды, до уровня заготовки, с которым пересекается вершина зерна в момент времени } \tau; \Delta r - \text{ радиальный съём материала при одном контакте поверхности с инструментом; } z - \text{ расстояние от основной плоскости до вершины зерна по координате } z; L_y - \text{ расстояние от основной плоскости}$$

до точки пересечения с уровнем u условной наружной поверхности круга.

При расчете значения длины пути резания l_p абразивными зёрнами, лежащими на различной глубине рабочего слоя абразивного инструмента для трех значений t_ϕ в случае шлифования закаленных образцов ($K_c = 0.9$) кругами зернистостью 25 ($n_3 = 5,2 \text{ шт/мм} = 5.2 \text{ шт/мм}$; $\rho_3 = 0.021 \text{ мм}$), диаметре круга равном 300 мм, диаметре заготовки 50 мм были получены данные, анализ которых показал, что при всех значениях t_ϕ наибольшая длина пути резания соответствует зёрнам, вершины которых лежат на условной рабочей поверхности инструмента ($u=0$). Для абразивных зёрен, лежащих в глубине рабочего слоя, длина пути резания быстро уменьшается и при $u \approx 0.75t_\phi$ асимптотически приближается к нулю. Зависимости износа вершины абразивного зерна аналогичны зависимостям длины пути резания и отличаются от них только масштабным фактором. Анализ формы кривых показывает, что аналитически они могут быть аппроксимированы степенной зависимостью вида

$$h_u = h_0 \left(1 - \frac{u}{t_\phi} \right)^\beta, \quad (3)$$

где β – коэффициент, определяемый аналитически.

Для рассматриваемого примера получена зависимость:

$$h_u = h_0 \left(1 - \frac{u}{t_\phi} \right)^2. \quad (4)$$

Сопоставление расчетных значений, полученных по точной зависимости (1) и по приближенной зависимости (3) показывает, что при значениях $u \leq 0,75t_\phi$ они отличаются не более, чем на 5% величины износа наиболее выступающих зёрен. При включении в математическую модель износа зависимости (4) становится возможным для кругов, работающих в режиме затупления, вести расчет только для наиболее выступающих зёрен и по ним судить об износе всех зёрен, лежащих в рабочем слое инструмента[7].

Для таких зёрен зависимость y_j от z из геометрических расчетов имеет вид:

$$y_j = t_\phi - \frac{z^2}{D_3} \quad (5)$$

$$\Delta r = t_{\text{TM}}^2 \left/ \left[1,478 t_{\text{TM}} + \frac{13,66 V_k}{K_c (V_k \pm V_u) n_3 \sqrt{D_3 \rho_3}} \right] \right.$$

а расстояние $z = -L_y$ при прохождении вершиной зерна участка зоны контакта ниже основной плоскости и $z = L_y$ при прохожде-

Δr определяется из уравнения

нии вершиной участка выше основной плоскости. Уравнение (2) для наиболее выступающих зерен примет вид:

$$P_k = \begin{cases} \exp\left(-\frac{2}{5} G \sqrt{D_3} \sum_{i=2}^n \left(\frac{z^2}{D_3} - i \Delta P\right)^{\frac{3}{2}}\right) \cdot p \text{ и } z < 0 \text{ и } \frac{z^2}{D_3} - \Delta P > 0, \\ 0, \text{ при } z \leq 0 \text{ и } \frac{z^2}{D_3} - \Delta r \leq 0, \\ \exp\left(-\frac{2}{5} G \left[\sqrt{D_3} \sum_{i=2}^n \frac{z^2}{D_3} - i \Delta P \right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{z^2}{D_3} - \Delta P \right) z \right] \right), \text{ при } z > 0 \end{cases}$$

$$\text{где } G = \frac{\pi K_c n_3 (V_k \pm V_u) \sqrt{2 \rho_3}}{V_u H_u^{\frac{3}{2}}}.$$

Для вычисления износа наиболее выступающих зерен по уравнениям (1) и (6) необходимо привести их к единой переменной. Согласно работе [6]

$$dz = V_k \cdot d\tau \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

где α – угол между вектором скорости резания и осью z .

Учитывая, что угол α для круглого наружного шлифования не превышает 1° [8], а $\cos \alpha \geq 0,999$, можно принять

$$dz = V_k \cdot d\tau. \quad (9)$$

Износ вершины зерна при одном k -ом контакте с изделием вычислится интегрированием уравнения (1)

$$h_{3k} = h_0 \int_{-L}^L P(\overline{M}) dz, \quad (10)$$

где L – расстояние от пересечения вершины зерна с уровнем $y=0$. Износ вершины зерна за время τ вычисляется по зависимости

$$h_3(\tau) = h_{3k} \cdot \nu_k \cdot \tau. \quad (11)$$

Обсуждение и результаты

Расчет по предложенным зависимостям, описывающим износ наиболее выступающих абразивных зерен от скорости детали и фактической глубины резания для случая шлифования образцов из закаленной стали диаметром 50 мм кругами ПП300Х40Х127 24А 25 Н СМ 2 К при $V_k = 35 \text{ м/с}$; $V_u = 0,28 \text{ м/с}$; $K_c = 0,9$; $\rho_3 = 0,021$; $n_3 = 5,2 \cdot 10^6 \text{ шт/м}^2$ показал, что износ зерен при постоянстве t_{TM} практически не зависит от скорости изделия [9-11].

Таким образом, уравнения износа носят функциональный характер и позволяют рассчитать его для различных режимов шлифования. Наибольшее влияние на износ оказывают величина относительного износа, фактическая глубина микрорезания, скорость абразивного инструмента.

С целью автоматизации прогнозирования параметров состояния рабочей поверхности абразивного инструмента разработан алгоритм, который включает в себя следующие основные этапы:

1. Ввод исходных данных (режима резания, значений параметров инструмента при $\tau=0$; значений относительного износа; жесткости технологической системы; шаг вычислений по τ и τ_{max}).

2. Определение режима работы инструмента (работа в режиме затупления, самозатачивания, частичного самозатачивания).

Определение режима выполняется сопоставлением прочности кромок и прочности закрепления зерен в круге с величиной сил резания, допускаемой технологической системой [12-13].

3. Расчет фактической глубины резания на основе решения уравнения баланса перемещений в технологической системе для первого шага. $\tau = h_{\tau}$.

4. Расчет величины износа вершин наиболее выступающих режущих кромок.

5. Расчет параметров формы зерен и их распределения по поверхности.

6. Расчет параметров формы инструмента.

7. Изменение $\tau\tau_{i+1} = \tau_i + h_{\tau}$, коррекция входных данных.

8. Сопоставление τ_{i+1} с τ_{max} , принятие решения о продолжении выполнения расчетов или печати результатов.

Выводы

Для решения задачи коррекции производительного цикла, кроме предложенных необходимо иметь зависимости, устанавливающие связь параметров поверхности инструмента и режимов резания с параметрами качества и производительности процесса [14,15]. Такая связь может быть определена на основе использования известной теоретико-вероятностной модели, основные зависимости которой приведены в работе [6].

Список литературы

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 747 с.

2. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р.Бишоп. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
3. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник/ С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Инфра-М, 2017. – 228 с.
4. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового тонкого шлифования: дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / С.М. Братан. – Одеса, 2006. – 550 с.
5. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
6. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 с.
7. Сизый Ю.А. Вероятность участия в резании кромок алмазного шлифовального круга / Ю.А. Сизый // Резание и инструмент. – 1974. – Вып. II. – С. 89–99.
8. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машгиз, 1951. – 177 с.
9. Вайнер, Л.Г. Модель износа шлифовальных кругов при двустороннем торцешлифовании с прямолинейной подачей заготовок / Л.Г. Вайнер, В.А. Носенко // Известия Юго-Западного гос. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 88–91.
10. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
11. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 182 с.
12. Hamdi H. Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms / H. Hamdi, M. Dursapt, H. Zahouani, Wear 254/12, 2003, pp.1294–1298.
13. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов/ Л.Н. Филимонов. Л.: Машиностроение, 1973. – 134с.
14. Malkin S. Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives / Stephen Malkin, Changsheng Guo. – New York: Industrial press, 2008. – 372p.
15. Барсуков Г.В. Моделирование технологических процессов абразивной обработки: монография. [Текст] / Г.В. Барсуков [и др.] – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 256 с.

Referenses

1. Besekerskiy V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya / V.A. Besekerskiy, Ye.P. Popov. – 4-ye izd., pererab. i dop. – SPb.: Professiya, 2003. – 747 s.

2. Dorf, R. Modern control systems / R. Dorf, R. Bishop. Per. from English. B. I. Kopylova. – M.: Laboratory of basic knowledge, 2002. – 832 p.
3. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik/ S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.:Infra-M, 2017. – 228 s.
4. Bratan S.M. Tekhnologicheskiye osnovy obespecheniya kachestva i povysheniya stabil'nosti vysokoproizvoditel'nogo chistovogo tonkogo shlifovaniya: dis. na soiskaniye uchenoy stepeni d-ra. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroyeniya» / S.M. Bratan. – Odesa, 2006. – 550 s.
5. Ostrovskiy V.I. Teoreticheskiye osnovy protsessa shlifovaniya / V.I. Ostrovskiy. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981. – 144 s.
6. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / YU.K. Novoselov. – M.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 s.
7. Sizyy YU.A. Veroyatnost' uchastiya v rezanii kromok almaznogo shlifoval'nogo kruga / YU.A. Sizyy // Rezaniye i instrument. – 1974. – Vyp. II. – S. 89–99.
8. Maslov Ye.N. Osnovy teorii shlifovaniya metallov / Ye.N. Maslov. – M.: Mashgiz, 1951. – 177 s.
9. Vayner, L.G. Model' iznosa shlifoval'nykh krugov pri dvustoronnem torteshlifovanii s pryamolineynoy podachey zagotovok / L.G. Vayner, V.A. Nosenko // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos. un-ta. – 2013. – № 3. – С. 88–91.
10. Loladze T.N. Iznos almazov i almaznykh krugov / T.N. Loladze, G.V. Bokuchava. – M.: Mashinostroyeniye, 1967. – 112 s.
11. Yakimov A.V. Upravleniye protsessom shlifovaniya / A.V. Yakimov [i dr.]. – Kiyev: Tekhnika, 1983. – 182 s.
12. Hamdi H. Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms / H. Hamdi, M. Dursapt, H. Zahouani, Wear 254/12, 2003, pp.1294–1298.
13. Filimonov L.N. Stoykost' shlifoval'nykh krugov / L.N. Filimonov. L.: Mashinostroyeniye, 1973. – 134s.
14. Malkin S. Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives / Stephen Malkin, Changsheng Guo. – New York: Industrial press, 2008. – 372p.
15. Barsukov G.V. Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov abrazivnoy obrabotki: monografiya. [Tekst] / G.V. Barsukov [i dr.]. – M.: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2011. – 256 s.

УДК 621.92

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАКАЛЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

А.Н. Шелковой¹, А.А. Клочко¹, М.И. Гасанов¹¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

Аннотация

Закаленные крупногабаритные модульные зубчатые колеса предполагают длительную эксплуатацию в условиях максимальных нагрузок знакопеременного характера. Эксплуатационные свойства закаленных зубчатых колес предлагается решать определением комплексных параметров, которые учитывают физическую картину эксплуатации, считаются безразмерными величинами и включают в себя те параметры качества поверхности, которые оказывают основное влияние на процесс эксплуатации закаленных крупномодульных зубчатых колес. Общие закономерности изнашивания эвольвентных зубчатых передач учитывают состояния поверхностного слоя: шероховатость эвольвентной поверхности, волнистость, параметры макроотклонения, микротвердость, остаточного напряжения поверхностного слоя, удельного давления, удельного скольжения. Для решения вопросов обеспечения износостойкости зубчатых колес предложено применять метод конечных элементов (МКЭ).

Ключевые слова: шлифование, закаленные модульные зубчатые колеса, эксплуатация, комплексные параметры, безразмерные величины, качество поверхности, изнашивание, шероховатость, волнистость, микротвердость, остаточные напряжения метод конечных элементов.

PROVIDING THE OPERATING PROPERTIES OF THE COMBINED GEAR WHEELS

A.N. Shelkovoy¹, A.A. Klochko¹, M.I. Hasanov¹¹National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine

Abstract

Toughened large-sized modular cog wheels assume long-term operation under conditions of maximum loads of alternating character. The operational properties of hardened gears are proposed to be solved by the definition of complex parameters that take into account the physical picture of operation, are considered dimensionless values and include those surface quality parameters that have a major influence on the operation of hardened coarse-grained gears. The general laws of wear of involute gears take into account the states of the surface layer: the roughness of the involute surface, the waviness, the parameters of the macro deviation, the microhardness, the residual stress of the surface layer, the specific pressure, the specific slip. To solve the problems of ensuring wear resistance of gear wheels, it is proposed to apply the finite element method (FEM).

Keywords: Grinding of the heated modular cog wheels, operation, complex parameters, dimensionless quantities, surface quality, wear, roughness, waviness, microhardness, residual stresses, finite element method.

Введение

Эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес решается определением комплексных параметров, которые учитывают физическую картину эксплуатации, считаются безразмерными величинами и включают в себя те параметры качества поверхности, которые оказывают основное влияние на процесс эксплуатации закаленных крупномодульных зубчатых ко-

лес [1, 2, 3].

Закаленные крупномодульные зубчатые колеса предполагают длительную эксплуатацию в условиях максимальных нагрузок знакопеременного характера.

Обсуждение и результаты

При изготовлении закаленных крупномодульных зубчатых колес необходимо обеспечить такое состояние контактируемых

эвольвентных поверхностей, которое гарантировало бы минимальный износ при эксплуатации зубчатых колес, а также постоянство коэффициента трения [4, 7, 10].

Уравнения для расчета интенсивности износа и коэффициента трения:

а) в период приработки [1, 2]:

$$J_h = \frac{2.5\nu^2 R_a^{2/3}}{n\lambda(\nu+1)S_m t_m^{3/2}} \cdot \frac{P}{K' \sigma_T} \sqrt{15\pi(2\pi W_z H_{\max})^{1/3} \left[1 + \frac{2\pi K' \sigma_T (1-\mu^2)}{E} \right]}, \quad (1)$$

$$f_h = \frac{\tau_0}{cK' \sigma_T} + \beta + \frac{4\alpha_f R_a^{2/3}}{S_m t_m} \sqrt{\frac{60\pi(2\pi W_z H_{\max})^{1/3}}{K' \sigma_T} \left(1 + \frac{2\pi K' \sigma_T (1-\mu^2)}{R_a E} \right)}. \quad (2)$$

б) в период нормального износа:

$$J = \frac{2.5\pi\nu^{0.5} P^{7/6}}{n\lambda(\nu+1)t_m^{3/2}(K' \sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{E S_m}}, \quad (3)$$

$$f = \frac{\tau_0}{cK' \sigma_T} + \beta + \frac{8\alpha_f (K' \sigma_T)^{1/3}}{t_m} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi P R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{E S_m t_m}}. \quad (4)$$

где ν – параметр опорной кривой профиля; n – число циклов воздействия; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на число циклов нагружения; σ_T – предел текучести материала; τ_0 – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей; α_f – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений; E – модуль упругости материала.

Минимальный линейный износ и стабильность коэффициента трения будет обеспечиваться в случае выполнения неравенств (5) и (6)

$$J_h \leq J; \quad (5)$$

$$f_h \leq f. \quad (6)$$

Решив эти неравенства таким образом, чтобы в правой части оказались параметры, зависящие от технологического обеспечения, а в левой – те из них, на которые процесс обработки не оказывает влияния, получим:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1-\mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K' (S_m - R_a)}. \quad (7)$$

Величиной R_a , стоящей в знаменателе правой части, можно пренебречь, так как при механических методах обработки они на два порядка меньше величины S_m (в формуле значение в микрометрах):

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1-\mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K' \cdot S_m}. \quad (8)$$

Запишем левую часть (7) в виде комплексного параметра I , характеризующего условие равномерного износа в различных стадиях обработки

$$I = \frac{R_a}{K' \cdot S_m}. \quad (9)$$

Значение комплексного параметра, обеспечивающего требуемое условие, определим из выражения (10)

$$[I] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1-\mu^2)}{E}. \quad (10)$$

Проведен эксперимент на машине трения МИ-1М с образцами из стали 40Х и 38ХМЮА с использованием масштабного фактора [6]. В качестве контр-тела применялась сталь 34ХНМ. Скорость относительно движения образцов 0,2 м/с. Результаты эксперимента табл. 1 показывают, что при выполнении условия $I \leq [I]$ наблюдается меньший линейный износ и наиболее стабильное значение коэффициента трения.

Таблица 1. Экспериментальные данные по интенсивности износа

Материал образца	Условия проведения эксперимента и значения параметров трения			
	$I \leq [I]$		$I \geq 2[I]$	
	Линейный износ	Коэффициент трения	Линейный износ	Коэффициент трения
40Х	0,006	0,64	0,03	0,26
38ХМЮА	0,0012	0,51	0,012	0,14

Экспериментальные данные по интенсивности износа и коэффициенту трения после 3 минут приработки образцов с контртелом из стали 34ХНМ приведены в (табл. 1) для средних значений и трех опытов.

Общие закономерности изнашивания эвольвентных зубчатых передач учитывают состояния поверхностного слоя: шероховатость эвольвентной поверхности, волнистость, параметры макроотклонения, микротвердость, остаточного напряжения поверхностного слоя, давления, удельного скольжения и создание условий самовосстановления эвольвентного профиля зубчатого колеса за счет эффекта избирательного переноса [9, 11].

Изменение этих факторов определяют распределение износа по профилю зуба. Теоретическое распределение износа профиля зуба предполагает отсутствие износа в полюсе зацепления, где относительное скольжение зубьев равно нулю.

Однако в отличие от теоретического распределения износ в полюсе, как показывает анализ экспериментальных данных, может быть существенным. На (рис. 1) представлена эпюра износа зуба шестерни, полученная на основании анализа опытных данных [4, 5].

Износ оценивался по изменению толщин зуба, измеренных в 10 точках профиля от ножки до головки зуба. Представляет определенный интерес износ в зоне полюса. Результаты стендовых испытаний показали, что на профиле зуба шестерни в процессе изнашивания образуется выемка, а на сопряженном зубе колеса – выступ. Повышенный износ наблюдался на головке зуба.

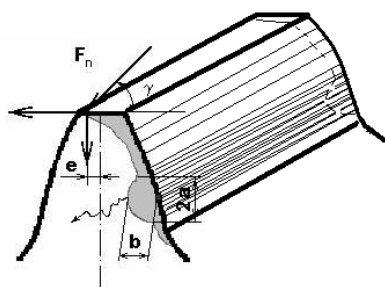


Рис. 1. Эпюра износа зуба шестерни зубчатой передачи

По степени износа или поврежденности рабочей поверхности зуба обычно оценивают ресурс передачи.

Ресурс закрытых передач определяется питтингом (рис. 2), причем площадь не должна превышать 30 % площади рабочей поверхности зуба при глубине питтингов свыше 10 % толщины зуба.



Рис. 2. Образование питтингов на поверхности зуба колеса

Нарушение кинематической точности наблюдается при износе, превышающем $0,025m$. Износ провоцирует зарождение и развитие трещин под действием напряжений растяжения. После того как образуется магистральная трещина, ее рост определяется значением коэффициента интенсивности напряжения [10, 12].

Одной из важных характеристик закаленных крупномодульных зубчатых колес является способность длительной работы до 10000 – 24000 часов без разрушения и скола зубьев, которые могут быть вызваны процессами усталости, выкрашиванием активных поверхностей и отслаиванием поверхностных слоев зубьев, абразивным износом зубьев, пластических деформаций зубьев и заеданием.

Влияние различных факторов на предел выносливости реальных деталей при проведении расчетов на долговечность определятся коэффициентом снижения предела выносливости K_y [11]

$$K_y = \frac{\sigma_{-1(Rz \leq 1)}}{\sigma_{-1D}}, \quad (11)$$

где $\sigma_{-1(Rz \leq 1)}$ – предел выносливости не упрочненного образца с высотой неровности профиля; $\sigma_{-1Д}$ – предел выносливости зубчатого колеса; K_y – коэффициент влияния факторов на сопротивление усталости.

При работе на сжатие или изгиб коэффициентом снижения предела выносливости K_y определяется по (12)

$$K_y = \left(\frac{K_{d\sigma}}{K_{F\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v K_A}, \quad (12)$$

где $K_{d\sigma}$ – коэффициенты, учитывающие влияние статического масштабного фактора; K_A – коэффициент анизотропии; K_v – коэффициент, учитывающий влияние отклонений структуры и твердости; K_{Fv} – коэффициент, учитывающий влияние качества поверхности; K_{σ} – коэффициент снижения пределов выносливости вследствие концентрации напряжений.

Так как в процессе подготовки образцов зубчатых колес влияние на коэффициенты $K_{d\sigma}$, K_A , K_v оказывается незначительное, их можно принять при рассмотрении равными единице, а значение коэффициента K_y записать в виде (13)

$$K_y = K_{\sigma} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1. \quad (13)$$

Создание поверхностного слоя приводит к изменению предела выносливости K_{Fv} , (14)

$$K_{F\sigma} = \left[(1.05 \div 1.20) - 0.0005 \sigma_{\text{Инов}} \right], \quad (14)$$

который с учетом допущения (15)

$$K^1 \approx \frac{\sigma_{\text{внов}}}{\sigma_{\text{с}}} \approx \frac{\sigma_{\text{Инов}}}{\sigma_{\text{И}}}, \quad (15)$$

и того, что K^1 при механических методах зубообработки колеблется в пределах $K^1 = (1.0 - 1.4)$, а при расчетах на прочность закаленных зубчатых колес принимается предел прочности на изгиб $\sigma_{\text{И}} = 1380$ МПа, записем в виде (16)

$$K_{F\sigma} = 0,75 \cdot K^1, \quad (16)$$

и тогда коэффициент снижения предела выносливости K_{σ} в приближительных расчетах можно принять

$$K_{\sigma} = 1 + g(\alpha_{\sigma} - 1), \quad (17)$$

где α_{σ} – коэффициент концентрации напряжений рассчитывается по (18)

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{200}{t_m S_m} \left[2R_{\text{max}} (R_{\text{max}} - R_p) \right]^{0.5}, \quad (18)$$

где g – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений, определяется зависимостью (19)

$$g = (\gamma \rho)^{0.20}, \quad (19)$$

где γ – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения величины $\sigma_{\text{Т}}/\sigma_{\text{в}}$; ρ – радиус скругления неровности, являющийся концентратором напряжений.

При наличии волнистости неровность, выступающую в качестве концентратора (рис. 3), представим в виде модели (рис. 4), где в качестве радиуса скруглений принят радиус скругления волн, определяемый из соотношения (20)

$$\rho_{\text{с}} = R_{\text{mw}} = \frac{125 S_{\text{mw}}}{6 R_a}. \quad (20)$$

Решим уравнение (12), выполнив соответствующие подстановки, известные из (18) – (20) [13, 14].

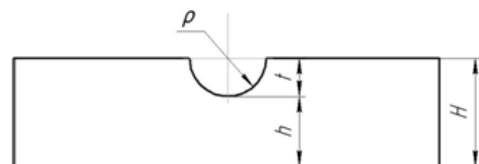


Рис. 3. Форма пластины, принятой в расчете

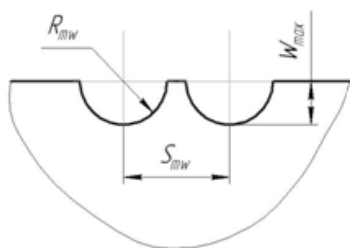


Рис. 4. Модель единичного концентратора напряжений

С целью упрощения зависимостей используем соотношения технологического обеспечения при механической зубообработке поверхностей (21)

$$K_{\sigma} = 1 + \frac{900 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (21)$$

Подставив значения (17), (21) в (22) получим (22)

$$K_y = \frac{1}{0,75K^I} + \frac{67,5 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (22)$$

Выполним подстановку (21) в (11) и решим его так, чтобы в правой части оказались параметры, формируемые при подготовке состояния поверхностного слоя образцов, а в

левой – не зависящие от технологического обеспечения

$$\frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{K^I \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \quad (23)$$

Обозначим правую часть через комплексный параметр D_T , характеризующий снижение порога усталости в зависимости от качества подготовки опорных поверхностей режущих пластин (24)

$$D_T = \frac{K^I \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \quad (24)$$

Левую часть обозначим через D_K (конструкторское значение параметра). Тогда получим (25)

$$D_K = \frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (25)$$

В практических расчетах определения влияния параметров технологического обеспечения на усталость режущих пластин для материалов, приведенных в табл. 2, соотношение $\sigma_T/\sigma_B = 0,9$ и при применении механических методов обработки $t_m \approx 0,55$; $\rho \approx (2 - 5)$; $\gamma \approx (0,3 - 0,5)$; $K^I \approx (1,1 - 1,3)$.

Наиболее удобно выражение (25) записать в виде (26)

$$\frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} = 0,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (26)$$

Таблица 2. – Результаты исследования

№ опыта	R_a , мкм	Расчет параметров D_K и D_T S_{mw} , мкм	S_m , мкм	D_K	D_T
1	0.63	1200	16	0.004	0.580
2	0.63	1200	32	0.250	0.290
3	2.5	1200	100	0.130	0.370
4	2.5	1200	125	0.260	0.300
5	0.63	2800	62	0.130	0.120
6	0.63	2800	125	0.001	0.100
7	2.5	1200	100	0.200	0.300
8	2.5	2800	100	0.230	0.520
9	2.5	2800	125	0.370	0.420
10	0.63	2800	125	0.170	0.010
11	0.63	2800	62	0.450	0.170
12	2.5	1200	125	0.210	0.240

Тогда

$$D_T = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m}, \quad (27)$$

$$D_K = 0,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right). \quad (28)$$

С целью проверки теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования. В качестве образцов использовались образцы, приведенные на (рис. 3 – 4). Результаты исследования и расчета параметров ДК и ДТ приведены в (табл. 2) (рис. 5).

При назначении данного комплексного параметра всегда соблюдается соотношение $D_K \leq D_T$.

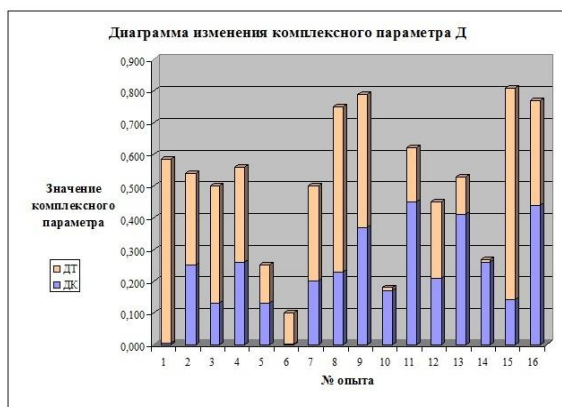


Рис. 5. Диаграмма изменения комплексного параметра $D \in \{D_T, D_K\}$

Эксплуатационные показатели контактирующих эвольвентных поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес изменяют свои значения. Происходящие изменения обуславливают изменение эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес в целом. Следовательно, необходимо стремиться создать состояние поверхности с, минимально изменяющей свои параметры качества в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации невозможно контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления. В то же время вид износа, характер разрушения и распределение действующих сил позволяют получить информацию о параметрах их эксплуатации и характере изно-

са (рис. 6).



Рис. 6. Превышение предела выносливости материала приводит к износу рабочей поверхности: а – начальная стадия; б – предельное состояние

Изменения параметров шероховатости, являющихся определяющими при оценке эксплуатационных свойств, будут минимальными при наступлении насыщения, которое определяется из условия (29)

$$Y_{nl} \geq 0,9 \cdot R_p. \quad (29)$$

Из теории контактного взаимодействия известно, что пластическая составляющая контактных перемещений (30)

$$Y_{nl} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot P \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max}}{A \cdot K^l \cdot \sigma_T} \right). \quad (30)$$

Подставим величины из (29) в (30), заменив $R_p \approx 3 \cdot R_a$ и выполнив преобразования так, чтобы в левой части оказались величины, не зависящие от технологического обеспечения, а в правой – формируемые в ходе изготовления (31)

$$\frac{P}{A \cdot \sigma_T} \geq \frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{\max}}. \quad (31)$$

Представим правую часть в виде комплексного параметра (32)

$$H = \frac{R_a^2 \cdot K^l}{W_z \cdot H_{\max}}. \quad (32)$$

Тогда выражение (6.83) записывается в виде (33)

$$H = \frac{P}{A \cdot \sigma_T}. \quad (33)$$

Экспериментальная проверка полученных зависимостей проводилась на контрольно-обкатном станке мод. 5A275 при контактировании зубчатых колес из стали 40Х и 34ХНМ с шероховатостью поверхности $R_a=2,5$ мкм, $\sigma_T = 1280$ МПа, $H_{\max} = 30$ мкм. Площадь контакта $A = 60,0$ мм.

С целью фиксации момента насыщения

проводилось измерение статического напряжения различных монотонно возрастающих контактных нагрузок. На (рис. 7) приведены расчетные и экспериментальные значения усилия нагрузки P до момента насыщения.

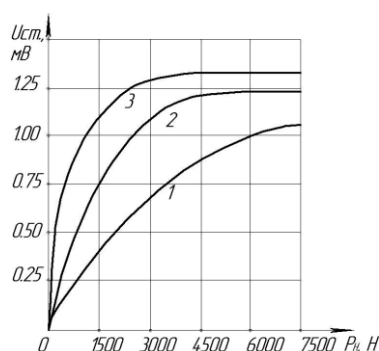


Рис. 7. Значения усилия нагрузки P до момента насыщения

На (рис. 8, а) показаны зависимости изменения величины линейного смещения вершины зуба колеса Y_n после 1000 часов работы, при окружной скорости 12 м/с, при регламентации параметра II . На (рис. 8, б) регламентация проводилась по параметру R_z .

Производственные испытания показывают, что такие показатели, как износ эвольвентной поверхности зуба колеса при контроле смещения отклонения колебания длины общей нормали W_{AT} , при одних и тех же регламентируемых параметрах качества поверхности имели меньшую дисперсию рассеяния при использовании предлагаемых рекомендаций, чем в случае традиционной регламентации состояния контактируемых поверхностей.

В настоящее время, в связи с активным внедрением в инженерную практику вычислительной техники, наиболее эффективным приближенным методом решения прикладных задач механики является метод конечных элементов (МКЭ) [6, 9, 13].

Ключевая идея МКЭ заключается в следующем: сплошная среда (конструкция в целом) заменяется дискретной путем разбиения ее на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора функций, представляющих собой напряжения и перемещения в указанной области.

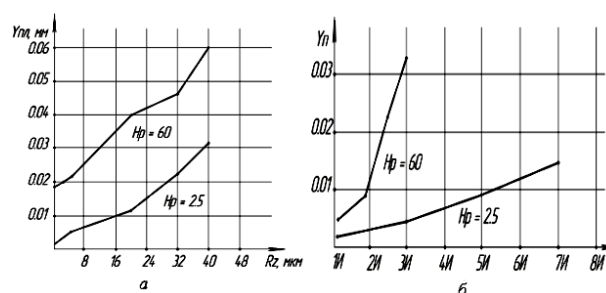


Рис. 8. Величина линейного смещения вершины зуба колеса: а – традиционная методика регламентации качества поверхности; б – регламентация при помощи комплексных параметров; (H_p – высота сглаживания макроотклонений, мкм)

Конечные элементы соединяются узлами. Взаимодействие конечных элементов друг с другом осуществляется только через узлы. Элементы расположены определенным образом в зависимости от конструкции объекта и закреплены в соответствии с граничными условиями. Конечные элементы позволяют адекватно описать все многообразие конструкций и деталей. Метод конечных элементов относится к вариационным методам теории упругости и позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние плоских и объемных элементов конструкций.

Для моделирования деформированного состояния зуба в настоящей работе были использованы модули пакета APM WinMachine: APM Studio и APM Structure3D. Профиль зуба строился посредством программы КОМПАС 3D V7 Plus. Модель зуба формировалась путем вырезания зуба из зубчатого колеса двумя плоскостями, проведенными через середины соседних впадин и ось вращения [13, 14]. Полученный сектор отсекался плоскостью, перпендикулярной оси симметрии зуба, на расстоянии от его основания, равном примерно двум модулям зацепления, что меньше минимальной рекомендуемой толщины обода зубчатого колеса. Конечные элементы формировались плоскостями, проведенными с определенным шагом по длине зуба и перпендикулярно оси симметрии зуба. Был заложен вариант нагружения, соответствующий последовательному приложению распределенной нагрузки по высоте зуба. В

первом приближении нагрузка по длине зуба считалась равномерно распределенной. Характер объемной деформации зуба – K , полученной при применении метода конечных элементов, представлен на (рис. 9).

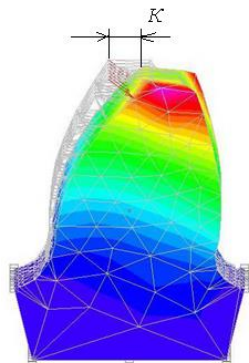


Рис. 9. Деформация зуба при применении метода конечных элементов

В связи с тем, что оба метода являются независимыми друг от друга, за истинное перемещение можно принять среднее значение двух методов. При таком допущении максимальная степень несовпадения результатов не превышает 20 %. Следует также учитывать то обстоятельство, что полное перемещение является суммой перемещений в результате объемной и контактной деформаций зуба, причем эти перемещения являются перемещениями одного порядка [9, 15].

Таким образом, можно считать, что максимальное несовпадение полного перемещения точки приложения силы при применении любого из двух методов не превышает 10 %.

Выводы

Общие закономерности изнашивания эвольвентных зубчатых передач учитывают влияние приведенного радиуса кривизны, состояния поверхностного слоя (шероховатость эвольвентной поверхности, волнистость, параметры макроотклонения, микротвердость, остаточного напряжения поверхностного слоя), давления, удельного скольжения и создание условий самовосстановления эвольвентного профиля зубчатого колеса за счет эффекта избирательного переноса.

По степени износа или поврежденности

рабочей поверхности зуба оценивают ресурс передачи. Ресурс закрытых передач определяется питтингом, причем площадь не должна превышать 30 % площади рабочей поверхности зуба при глубине питтингов свыше 10 % толщины зуба.

В процессе эксплуатации показатели контактирующих эвольвентных поверхностей, закаленных крупномодульных зубчатых колес изменяют свои значения и эти изменения обуславливают изменение эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес. Следовательно, необходимо формировать состояние поверхности с минимально изменяющимися параметрами качества в процессе эксплуатации.

Для решения вопросов обеспечения износостойкости зубчатых колес предложено применять метод конечных элементов (МКЭ), при котором сплошная среда эвольвентных контактируемых поверхностей заменяется дискретной путем дифференцирования ее на конечные элементы, в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора функций, представляющих собой напряжения и перемещения в указанной области. Конечные элементы соединяются узлами. Взаимодействие конечных элементов друг с другом осуществляется только через узлы.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Г. Суслов, А.А. Ключко // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2016: сборник научных трудов [Текст] / Научно-производственный кооператив «ОНИКС». – Ирбит: НПК «ОНИКС», 2016. – С. 105–119. ISBN 978-5-906703-10-1, УДК 621, ББК 39.3, П 68.
2. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 2: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Ключко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // Х.: НТУ «ХПИ», 2016. 323 с. На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.
3. Степанов М. С. Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей / М. С. Степанов, А. А. Ключко, А.Н. Кравцов // Физические и компьютерные технологии. Труды

- 21-й Международной научно-практической конференции. 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира, 2015. – С. 68–76. – ISBN 978-966-383-658-4.
4. Тимофеев Ю. В. Зависимость эксплуатационных характеристик крупномодульных зубчатых колес от макрошероховатости их поверхностей / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко // Наукові нотатки: зб. наук. праць. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – Вип. 51. – С. 230–236.
 5. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Сборник научных трудов “Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю. М. Соломенцев. 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.
 6. Пермяков А. А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталей тяжелых токарных станков / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, М. И. Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково практичної конференції, Україна, м. Тернопіль, 11–12 травня 2017. м. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 188.
 7. Технологічні методи формоутворення поверхневого шару загартованих зубчастих коліс / О. О. Клочко, Є. В. Мироненко, О. О. Анциферова, О. М. Лішенко // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів V-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8–12 лютого 2016 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – С. 51–52.
 8. Стабілізація трибологічного контактування у зубчастих передачах технологічними методами / О. О. Клочко, М. І. Гасанов, Є. В. Басова, Д. О. Кравченко // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів V-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8–12 лютого 2016 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – С. 50–51.
 9. Шелковой А. Н. Технологические условия формирования параметров поверхностного слоя зубчатых колес и их влияние на эксплуатационные свойства / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, О. А. Анциферова, С. Ю. Палашек // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Международной научно-практической конференции. 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира, 2015. – С. 107–120. – ISBN 978-966-383-658-4.
 10. Пат. на корисну модель 104899 UA, МПК G01M 13/02, F16H 57/01. Стенд для випробовування коробок передач / Б. В. Долишній, М. Й. Бурда, О. О. Клочко, Є. В. Остапович. – № u2015 07938 ; заявл. 10.08.15 ; опубл. 25.02.16, Бюл. № 4. – 4 с. : ил.
 11. Klochko A., Ropjak L., Ostapovich E. (2015) Tekhnolohicheskie aspekty povysheniia effektivnosti i kachestva zuboobrabotki krupnomodulnykh zubchatykh ventsov [Technological aspects of efficiency and quality coarsegrained toothed crown gear treatment]. Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Fundamentalni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohii" (Tern., 19–21 travnia 2015 roku), pp. 91–92 [in Russian].
 12. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А. А. Клочко, Е. В. Мироненко, О. А. Анциферова, Л. А. Макастрова, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2015. – Вып. 37. – С. 105–112.
 13. Некоторые аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Набока, Е. В. Мироненко, А. Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2015. – Вып. 36. – С. 136–149.
 14. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2–6 лютого 2015 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – С. 103.
 15. Клочко А. А. Влияние точностных параметров зубчатых колес вертикально-фрезерных обрабатывающих центров на их динамическую устойчивость / А. А. Клочко, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 35. – С. 31–35.

References

1. Suslov A. G. Obshchie printsipy modelirovaniia optimal'nogo upravleniia parametrami tochnosti, kachestva i proizvoditel'nosti zuboobrabotki zakalennykh krupnomodul'nykh zubchatykh koles / A. G. Suslov, A. A. Klochko // Problemy proektirovaniia i avtomatizatsii v mashinostroenii – 2016: sbornik nauchnykh trudov [Tekst] / Nauchno-proizvodstvennyi kooperativ «ONIKS». – Irbit: NPK «ONIKS», 2016. – S. 105–119. ISBN 978-5-906703-10-1, UDK 621, BBK 39.3, P 68.
2. Imitatsionnoe modelirovanie v zadachakh mashinostroitel'nogo proizvodstva v 2-kh tomakh, T. 2:

- ucheb. posobie / A.V. Belovol, A.A. Klochko, E.V. Naboka, A.O. Skorkin, A.N. Shelkovoi. pod redaktsiei A.N. Shelkovogo // Kh.: NTU «KhPI», 2016. 323 s. Na russkom iazyke. ISBN978-966-593-749-4.
3. Stepanov M. S. Mnogokriterial'naia reglaman-tatsiia parametrov poverkhnostnogo sloia detalei / M. S. Stepanov, A. A. Klochko, A.N. Kravtsov // Fizicheskie i komp'iuternye tekhnologii. Trudy 21-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 24–25 dekabria 2015, g.Khar'kov. – D.: Lira, 2015. –S. 68–76. – ISBN 978-966-383-658-4.
 4. Timofeev Iu. V. Zavisimost' ekspluatatsionnykh kharakteristik krupnomodul'nykh zubchatykh koles ot makrosherozhovosti ikh poverkhnosti / Iu. V. Timofeev, A. N. Shelkovoi, A. A. Klochko // Naukovi notatki: zb. nauk. prats'. – Luts'k: RVV Luts'kogo NTU, 2015. – Vip. 51. – S. 230–236.
 5. Metodologiiia razrobotki modeli upravleniia tochnost'iu, kachestvom i proizvoditel'nost'iu formoobrazovaniia pri obrabotke zakalennykh krupnomodul'nykh zubchatykh koles / Iu. V. Timofeev, A. N. Shelkovoi, E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Sbornik nauch-nykh trudov “Problemy proektirovaniia i avto-matizatsii v mashinostroenii: sbornik nauchnykh trudov [Tekst] / Donbasskaia gosudarstvennaia mashinostroitel'naia akademiia; Zakrytoe aktsi-onernoie obshchestvo «ONIKS». – Kramatorsk: DGMA, Irbit: ZAO «ONIKS», Seria: «Proekti-rovanie i primenenie rezhushchego instrumenta v mashinostroenii» / Obshch. red. Iu.M. Solomen-tsev). 2014. – S. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.
 6. Permiakov A.A. Analiz pogreshnostei tekhnologicheskikh protsessov obrabotki otverstii s perekreshchivaiushchimisia i pereseкаиushchimisia osiami korpusnykh detaliakh tiazhelykh tokarnykh stankov / A.A. Permiakov, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Ob-ladnannia i tekhnologii suchasnogo mashinobudu-vannia: materialy Vseukraïn'koï naukovo prak-tichnoï konferentsii, Ukraïna, m.Ternopil', 11–12 travnia 2017. m.Ternopil': Ternopil'skii natsio-nal'nii tekhnichnii universitet imeni Ivana Pu-liiua, 2017. – S. 188..
 7. Tekhnologichni metodi formoutvorennia poverkhnovogo sharu zagartovanikh zubchastikh kolis / O. O. Klochko, E. V. Mironenko, O. O. Antsiferova, O. M. Lishenko // Zbirnik naukovikh prats'. Progresivni tekhnologii v mashinobuduvanni: Tezi dokladiv V-oï Vseukraïns'koï naukovo-tekhnichnoï konferentsii, 8-12 liutogo 2016 r. – Natsional'nii universitet «L'vivs'ka politekhnik». – L'viv, 2016. – S. 51–52.
 8. Stabilizatsiia tribologichnogo kontaktuvannia u zubchastikh peredach tekhnologichnimi metodami / O. O. Klochko, M. I. Gasanov, E. V. Basova, D. O. Kravchenko // Zbirnik naukovikh prats'. Progresivni tekhnologii v mashinobuduvanni: Tezi dokladiv V-oï Vseukraïns'koï naukovo-tekhnichnoï konferentsii, 8-12 liutogo 2016 r. – Natsional'nii universitet «L'vivs'ka politekhnik». – L'viv, 2016. – S. 50–51.
 9. Shelkovoi A.N. Tekhnologicheskie usloviia formirovaniia parametrov poverkhnostnogo sloia zubchatykh koles i ikh vliianie na ekspluatatsionnye svoistva / A. N. Shelkovoi, A. A. Klochko, O.A. Antsyferova, S.Iu.Palashek // Fizicheskie i komp'iuternye tekhnologii. Trudy 21-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 24–25 dekabria 2015, g.Khar'kov. – D.: Lira, 2015. –S. 107–120. – ISBN 978-966-383-658-4.
 10. Pat. na korisnu model' 104899 UA, MPK G01M 13/02, F16H 57/01. Stend dlia viprobuvuvannia korobok peredach / B.V.Dolishnii, M.I.Burda, O. O. Klochko, E.V.Ostapovich. – № u2015 07938; zaïavl. 10.08.15; opubl. 25.02.16, Biul. № 4. – 4 s.: il.
 11. Klochko A., Ropjak L., Ostapovich E. (2015) Tekhnologicheskie aspekty povysheniia effektivnosti i kachestva zuboobrabotki krupnomodulnykh zubchatykh ventsov [Technological aspects of efficiency and quality coarsegrained toothed crown gear treatment]. Materialy Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii "Fundamentalni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohii" (Tern., 19–21 travnia 2015 roku), pp. 91-92 [in Russian].
 12. Tekhnologicheskie protsessy formirovaniia poverkhnostnogo sloia zubchatykh koles tiazhelykh tokarnykh stankov s ChPU / A.A. Klochko, E.V. Mironenko, O.A. Antsyferova., L.A. Makatrova., E.H. Kireev // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiia tekhnologicheskikh sistem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2015. – Vyp. 37. – S. 105–112.
 13. Nekotorye aspekty imitatsionnogo matematicheskogo modelirovaniia geometricheskikh parametrov protsessa zubofrezerovaniia / A.N. Shelkovoi, A.A. Klochko, E.V. Naboka, E.V. Mironenko, A.N. Kravtsov // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiia tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2015. – Vyp. 36. – S. 136–149.
 14. Analiz parametrov poverkhnostnogo sloia zakalennykh krupnomodul'nykh zubchatykh koles, kharakterizuiushchikh ikh ekspluatatsionnye svoistva / Iu. V. Timofeev, E. V. Mironenko, A. A. Klochko, A. N. Kravtsov // Zbirnik naukovikh prats'. Progresivni tekhnologii v mashinobuduvanni: Tezi dokladiv III-oï Vseukraïns'koï naukovo-tekhnichnoï konferentsii, 2-6 liutogo 2015 r. – Natsional'nii universitet «L'vivs'ka politekhnik». – L'viv, 2015. – S. 103.
 15. Klochko A.A. Vliianie tochnostnykh parametrov zubchatykh koles vertikal'no-frezernykh obrabatyvaiushchikh tsentrov na ikh dinamicheskuiu ustoi-chivost' / A.A. Klochko, I. G. Godzula // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiia tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – Vyp. 35. – S. 31–35.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №8 2017

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Машиностроение и машиноведение (05.02.00)
- Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00)
- Транспорт (05.22.00)
- Безопасность деятельности человека (05.26.00)
- Технология продовольственных продуктов (05.18.00)

Адрес редакции:

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

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

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

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

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

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

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