

Редакционный совет:

Голенков В.А. д-р техн. наук,
проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук,
проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редколлегия

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук,
проф., заслуженный деятель науки
Российской Федерации

Заместители главного редактора:

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф.,
член-кор. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук,
проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Малнин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск:

Василенко Ю.В. канд. техн. наук,
доц.

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,
55-05-81

www.gu-unpk.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по
надзору в сфере связи, информацион-
ных технологий и массовых комму-
никаций. Свидетельство ПИ №
ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса
России»

© Госуниверситет – УНПК, 2012

Содержание

Естественные науки

Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Применение методов анализа размерностей к исследованию электромеханических характеристик тяговых асинхронных двигателей 3

Моделирование технологических процессов

Аникеева О.В. Реализация системы ТРМ на основе обеспечения технологической надежности станков 12
Антамонов И.А. Исследование прочностных характеристик зубчатых колес методом конечных элементов 19
Вехина А.П., Самейцев А.В. Разработка тренажера для обучения работе на экскаваторе 25
Ерзин О.А., Господынько Е.С. Энергетическая модель технологической системы 29
Жмурин В.В., Сальников В.С. Влияние качества балансировки на процесс резания 36
Зуйкин Р.А., Афонин А.Н. Влияние припуска под накатывание при режущей-деформирующей обработке трапециевидных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования 43
Каменских А.А., Адамов А.А. Численное исследование сферического контактного узла с полимерной антифрикционной прослойкой 48
Маркин С.А., Подрезова О.С., Брусов С.И. Исследование погрешностей обработки винтовых поверхностей при неравномерном распределении припуска между проходками 55
Тюхта А.В. Математическая модель взаимодействия частицы шлама со шторой из СОЖ при плоском шлифовании периферией круга 60

Конструирование, расчеты, материалы

Ерёмин А.А. Конструктивная сложность деталей и её применение 68
Киселева С.В., Глушкова А.Д. Изготовление прототипов деталей сложной формы на 3D принтере 76

Машиностроительные технологии и инструменты

Аверкина Н.Е. Обзор методов правки алмазных кругов на металлической связке 82
Александров А.А., Барсуков Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей 89
Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Адаптация промышленных молотов для деформационного упрочнения деталей машин 94
Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Кучев П.С., Струков Н.Н. Технологические варианты плазменной закалки на токе обратной полярной полярности 99
Воронков А.В., Симаков А.А., Василенко О.А., Василенко Ю.В. Экспериментальные исследования шероховатости при плоском шлифовании с поперечной осцилляцией заготовки 104

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

Дьяченко С.В. Опыт нормирования расхода природного газа на отопление хлебопекарных предприятий 110
Сапронова Н.П., Макеев Е.А., Шишенок Б.В., Корячкин В.П. Изучение реологических свойств крекерного теста и качества крекеров с использованием кукурузной муки 113
Москина Е.Л., Селеменов М.Ф., Конратенко В.А. Совершенствование технологических процессов путем модернизации раскройного оборудования 118

Инновации и кадры в машиностроении

Кваскова Т.В., Шульцешова Н.В., Баркова Е.С. Оптимизация последовательности запуска моделей в производство на основе технологической однородности с использованием двухигольного оборудования 124

Приборостроение и биотехнические системы

Беликов П.П., Лебедева Л.И., Марков В.В. Получение эмпирической формулы силы сочленения прямоугольных электрических соединителей с произвольным количеством контактных пар по результатам определительных испытаний 130
Подмастерьев К.В., Моисеев С.А. Прогнозирующий контроль радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени 135

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Анисимов Р.В., Ревенков А.А. Контроль точностных параметров зубчатых колес с внутренними зубьями незвольевитного профиля 145
Картавцев И.С. Адаптивная оптимизация процесса текущего контроля и подналадки станка с ЧПУ 151
Тимошин М.И., Золотых С.Ф. Разработка методических основ использования динамических характеристик для сертификации токарных станков 159



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 3 - 2 (293) 2012

May - June

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – federal state educational institution of the higher vocational training
«State University – Educational-Science-Production Complex»
(State University ESPC)

Editorial council:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president

Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president

Borzenkov M.I. Candidat Sc. Tech.,
Assistant Prof., secretary

Astafichev P.A. Doc. Sc. Low., Prof.

Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

Editor-in-chief

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.

Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.

Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph. - Math, Prof.

Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS

Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof.

Malinin V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.

Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.

Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition:

Vasilenko YU.V. Can. Sc. Tech.,
assistant prof.

Address

302020 Orel,
Naugorskoye Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,
55-05-81
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency
of supervision in sphere of communica-
tion, information technology and mass
communications. The certificate of
registration PI № FS77-47351 from
03.11.2011

Index on the catalogue of the «**Pressa
Rossii**» 29504

© State University ESPC, 2012

Contents

Natural sciences

Kosmodamianskiy A.S., Vorobyev V.I., Pugachev A.A. Research of traction asynchronous machine electromechanical performances by dimension analysis technique3

Modelling of technological processes

Anikeeva O.V. Realization of a TPM system on basis of a technological reliability of machine tools securing12
Antamonov I.A. The analysis of gears strength properties with finite element analysis19
Vekhina A.P., Sameyshchev A.V. An excavator simulator development25
Erzin O.A., Gospodinko E.S. The energy model of a manufacturing system29
Zhmurin V.V., Salnikov V.S. Influence of quality of balancing on cutting process36
Zuykin R.A., Afonin A.N. Influence of a rough tolerance under a rolling at a cutting-forming handlin of trapezoidal threads on effective strains and forces of deformation43
Kamenskih A.A., Adamov A.A. Numerical investigation of spherical contact system with a polymeric antifrictional interlayer48
Markin S.A., Podrezova O.S., Brusov S.I. Research of the processing quality at any distribution of the cut layer on multipass milling of the helix surfaces55
Tyukhta A.V. Mathematical model of sludge particles with curtains coolant in from a plane grinding periphery of the circle60

Designing, calculations, materials

Yeriomina A.A. Design complexity of parts and its applications68
Kiselyova S.V., Glushkova A.D. Production of prototypes of complicated shape parts on 3D printer76

Machine-building technologies and tools

Averkina N.E. The review of methods of correction of diamond circles on metal copula82
Alexandrov A.A., Barsukov G.V. Determination of the component composition of the masses a mixture of abrasive material for cutting superionic waterjet stream89
Kirichek A.V., Solovyev D.L., Silantiev S.A. Adaptation of industrial hammers for deformation hardening of machine parts94
Belinin D.S., Shicin Y.D., Kuchev P.S., Strukov N.N. Technological options of plasma surface hardening on reverse polarity99
Voronkov A.V., Simakov A.A., Vasilenko O.A., Vasilenko YU.V. Roughness experimental research by flat grinding with cross-section oscillation of workpiece104

Machines, devices, technologies, light and food industry

Dyachenko S.V. Experience rationing natural gas consumption for heating bakeries110
Sapronova N.P., Makeev E.A., Shishenok B.V., Koryachkin V.P. Studying of rheological properties of krekerного of dough and quality of crackers with use of the corn flour113
Moskina E.L., Kondratenko V.A., Selemenev M.F. The perfection of technological processes by modernization of cutout equipment118

Innovations and personnel in machine-building

Kvaskova T.V., Shuldeshova N.V., Barkova E.S. Optimization of calculation and sequence of launching models in production on the basis of technological uniformity using the two – needle equipment124

Instrument-building and biotechnical systems

Belikov P.P., Lebedeva L.I., Larichev A.A. Receive of empiric formula strength of junction the rectangular electrical connectors with arbitrary quantity of contact pairs on the results trials for define130
Podmasteryev K.V., Moiseev S.A. The predicting control of radio-electronic equipment with adaptive intervals of time135

Control, diagnostics, tests and quality management

Anisimov R.V., Revenkov A.A. Monitoring of the exactitude of parameters of toothed wheels with interior teeth not involute the profile145
Kartavtsev I.S. Adaptive optimization of the in-process NC machine control and adjustment151
Timoshin M.L., Zolotix S.Z. Development of metodology principles of dynamic characteristics of certification for lathes159

УДК 629.423.31

А.С. КОСМОДАМИАНСКИЙ, В.И. ВОРОБЬЕВ, А.А. ПУГАЧЕВ

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ
К ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

На основе метода анализа размерностей теории подобия и моделирования доказывается возможность исследований электромеханических характеристик тяговых асинхронных двигателей на физических моделях тяговых электроприводов меньшей мощности. Приводятся количественные показатели погрешностей данного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тяговый электропривод, частотное регулирование, натурный и физический эксперименты, критерии подобия

Появление тяговых передач и электрических приводов с использованием асинхронной машины в качестве тягового двигателя и преобразователей частоты, основанных на дискретной коммутации напряжения или тока, приводит к значительному увеличению необходимости рассматривать процессы в электрических и механических цепях совместно. Такое усложнение исследуемого объекта, в свою очередь, требует значительного увеличения объема исследований в целом. Поскольку возможность увеличения объема натурных экспериментов на практике ограничена, то это означает в первую очередь потребность в резком увеличении объема предварительных и сопутствующих объединенных исследований энергетических цепей и тяговых приводов методами математического и стендового моделирования и развития методики взаимосвязи работ по такому моделированию с натурным экспериментом. При этом, в связи со значительной стоимостью полноразмерных стендовых установок бесколлекторного привода, в значительной мере за счет их преобразовательной части, с одной стороны, и тем, что математические модели не всегда позволяют выявить все проблемы устойчивости и динамики объединенной электрической и механической систем, с другой, часть работ имеет смысл проводить на стендах, которые представляют собой физические модели таких систем и которые могут быть на порядки дешевле полноразмерного стенда. Особенно это важно для случаев, когда возникает проблема проведения большого числа экспериментов, требующих значительных и дорогостоящих переделок натурального стенда.

Энергетическая цепь и тяговый привод тепловоза с электрической передачей переменного тока представляет собой сложную электромеханическую систему, в состав которой входят следующие основные элементы:

- дизель-генератор переменного тока (Д-Г);
- выпрямитель (В);
- автономный инвертор (АИ);
- асинхронный тяговый электродвигатель (АД);
- системы автоматического регулирования (САР) и управления (СУ), обеспечивающие автоматическое регулирование мощности Д-Г с формированием требуемой внешней характеристики генератора и регулирование по заданному закону амплитуды и частоты приложенного к АД напряжения;
- механическую часть привода, включающую зубчатую передачу, демпфирующие устройства и колесную пару;
- нагрузку (поезд), характерной особенностью которого является большая инерционность (масса).

В энергетической цепи тепловоза с электрической передачей переменного тока и электромеханической системе его тягового привода с асинхронными тяговыми электродвигателями целесообразно моделировать их основную (силовую) часть, поскольку из-за большей установленной мощности экспериментальное исследование в производственных условиях и в условиях эксплуатации сопряжено с большими затратами средств и времени.

Что касается аппаратуры и систем автоматического регулирования и управления, то эти элементы целесообразно включать в модель в их реальном виде. Это облегчает построение самой модели и позволяет избежать ряда ошибок, которые могут возникнуть при моделировании аппаратов и устройств, явления в которых известны лишь приближенно.

Теория подобия и основанное на ней моделирование не могут с абсолютной полнотой воспроизводить все стороны и детали изучаемых явлений. Различают три способа моделирования [1]: полное, неполное и приближенное. При полном моделировании и соответственно подобии все основные процессы, характеризующие изучаемые явления, подобно изменяются и во времени и в пространстве. При неполном моделировании протекание всех основных процессов в модели подобно только частично (или только во времени, или только в пространстве).

Приближенное моделирование характеризуется тем, что некоторые факторы, заведомо влияющие, но не оказывающие решающего значения на протекание процесса, моделируются приближенно или совсем не моделируются. Поэтому между некоторыми параметрами модели или некоторыми характеристиками ее режимов работы не существует соотношений подобия. Это вызывает погрешность, которую можно оценить тем или иным способом.

В теории подобия и моделирования [1, 2] разработано два основных способа определения критериев подобия. Первый способ состоит в приведении дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый физический процесс, к безразмерной форме. Вторым способом основан на применении π - теоремы. В этом случае критерии подобия определяют путем анализа размерностей параметров, определяющих рассматриваемый физический процесс. Имеется также один дополнительный способ - способ использования системы относительных единиц. Возможность применения этого способа вытекает из следующего утверждения [2]: "если параметры, характеризующие явление, отнесены к определенным образом выбранным базовым величинам и при этом равны между собой, то явления подобны". Приведенное утверждение является следствием основных теорем подобия. Выбор способа определения критериев подобия производят в зависимости от физических свойств моделируемого объекта и характера решаемых задач.

Сложность устройств и систем энергетической цепи тепловоза с электрической передачей переменного тока приводит к тому, что при построении модели его тягового привода с частотно-регулируемыми АД может быть использовано только неполное или приближенное моделирование. При этом, как указано ранее, моделировать следует только силовую энергетическую и механическую части привода, а САР и СУ следует строить на базе натуральных образцов тепловозной электроаппаратуры.

На кафедре «Локомотивы» Брянского государственного технического университета (БГТУ) разработана и построена физическая модель энергетической цепи и тягового привода тепловоза с электрической передачей переменного тока [3 - 6], содержащая все физические звенья натурального образца. Для определения критериев подобия АД использован способ относительных единиц, а для определения критериев подобия механической части привода - π - теорема. САР и СУ собраны на базе реальной электроаппаратуры.

В общем случае требования к физической модели электрической машины определяется тем, для изучения каких процессов она предназначена. Так для определения оптимальных размеров с помощью подобия, отработки новых конструктивных элементов и усовершенствования электрических машин требуется полное подобие, учитывающее распределение электромагнитных полей [7].

При моделировании электрической машины как элемента энергетической системы достаточно осуществления неполного, а в отдельных случаях и приближенного подобия. В такой модели [1] может быть не полностью отражено влияние на ее параметры изменения частоты, насыщения, потерь в отдельных обмотках, вихревых токах и т.д.

Авторами работы производится исследование динамики механической части тягового привода при наличии возмущающего воздействия со стороны вала приводного электродвигателя. Нас не интересуют электромагнитные поля и электромагнитные переходные процессы в машине. АД рассматривается как элемент электромеханической системы, моделирующей возмущающее воздействие. Поэтому, при построении модели АД допустимо использование приближенного подобия.

При приближенном подобии, как правило, нецелесообразно проектировать и строить специальную модель-машину, а более выгодно использование машин относительно малой мощности общепромышленного назначения.

Известно, что параметры машин (сопротивления обмоток, число полюсов, номинальные значения частоты и напряжения и т.д.) и характер протекания переходных процессов в машинах в значительной степени зависят от их мощности. Поэтому при использовании машин малой мощности в качестве моделей необходимо оценивать погрешность эксперимента с учетом особенностей режимов их работы.

Теория асинхронного двигателя с частотным управлением разработана достаточно полно [8, 9]. В ее основу положена эквивалентная схема замещения (рис. 1).

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: r_1 , x_1 , r'_2 , x'_2 – соответственно активное и индуктивное сопротивление обмотки статора и ротора, приведенное к обмотке статора; x_0 – индуктивное сопротивление намагничивающего контура; $\gamma = U_1 / U_{1H}$, $\alpha = f_1 / f_{1H}$ – относительные значения напряжения и частоты тока статора соответственно; $\beta = f_2 / f_{1H}$ – абсолютное скольжение; f_2 – частота тока ротора; U_1 – напряжение обмотки статора. Здесь и далее индексом «H» обозначаются номинальные значения величин.

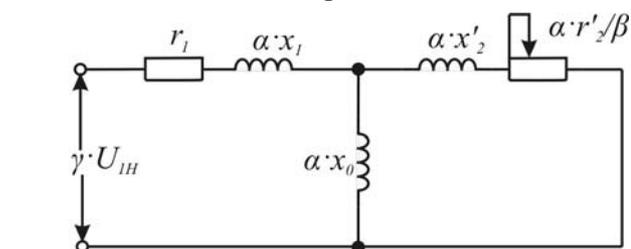


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя

В случае частотно-регулируемого АД в качестве независимых параметров целесообразно [4] принять ток, потокосцепления и угловую частоту, а в качестве базовых значений величины:

- базовый ток I_δ – ток статора, равный действующему значению длительного (часового) фазного тока: $I_\delta = I_{1H}$;
- базовое потокосцепление Φ_δ – потокосцепление, равное действующему длительному (часовому) значению потокосцепления: $\Phi_\delta = \Phi_n$;
- базовая частота вращения вала ротора ω_δ .

Для базовых величин зависимых параметров из анализа формул размерностей и уравнений связи получаем:

- базовую частоту тока статора: $f_\delta = \frac{\omega_\delta}{2\pi}$;

- базовую электродвижущую силу (ЭДС) и напряжение, т.е. ЭДС и напряжение, создаваемые базовым потокосцеплением при базовой частоте: $E_\delta = U_\delta = U_{1H} \frac{f_\delta}{f_{1H}}$;

- базовый магнитный поток: $\Phi_\delta = \frac{U_\delta}{C_1 f_\delta} = \frac{U_{1H}}{C_1 f_{1H}}$,

где C_1 – конструктивная постоянная машины;

- базовое сопротивление: $Z_{\bar{\sigma}} = \frac{U_{\bar{\sigma}}}{I_{\bar{\sigma}}} = \frac{U_{1H} f_{\bar{\sigma}}}{I_{1H} f_{1H}}$;

- базовую частоту вращения вала ротора: $\omega_{1\bar{\sigma}} = \frac{\omega_{\bar{\sigma}}}{p} = \omega_{1H} \frac{f_{\bar{\sigma}}}{f_{1H}}$,

где p – число пар полюсов;

- базовую мощность: $P_{\bar{\sigma}} = 3I_{\bar{\sigma}}U_{\bar{\sigma}} = 3U_{1H}I_{1H} \frac{f_{\bar{\sigma}}}{f_{1H}}$;

- базовый момент: $M_{\bar{\sigma}} = \frac{P_{\bar{\sigma}}}{\omega_{1\bar{\sigma}}} = \frac{3U_{1H}I_{1H}}{\omega_{1H}}$.

В относительных единицах получаем:

$$\frac{I_1}{I_{\bar{\sigma}}} = \gamma F_I(\alpha, \beta), \tag{1}$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\bar{\sigma}}} = \gamma F_{\Phi}(\alpha, \beta),$$

$$\frac{M}{M_{\bar{\sigma}}} = \gamma^2 F_M(\alpha, \beta),$$

где

$$F_I(\alpha, \beta) = f_{1H} \frac{Z_{\bar{\sigma}}}{\eta_1} \frac{\sqrt{b+c} \frac{1}{\beta^2}}{\sqrt{(b+c\alpha^2) + (d+e\alpha^2) \frac{1}{\beta^2} + 2\frac{\alpha}{\beta}}}, \tag{2}$$

$$F_{\Phi}(\alpha, \beta) = \frac{\sqrt{\frac{x_2'^2}{\eta_1 \eta_2'} + \frac{r_2'}{\eta_1} \frac{1}{\beta^2}}}{\sqrt{(b+c\alpha^2) + (d+e\alpha^2) \frac{1}{\beta^2} + 2\frac{\alpha}{\beta}}}, \tag{3}$$

$$F_M(\alpha, \beta) = \frac{f_{1H}}{f_{\bar{\sigma}}} \frac{Z_{\bar{\sigma}}}{\eta_1} \frac{1}{\sqrt{(b+c\alpha^2)\beta + (d+e\alpha^2) \frac{1}{\beta} + 2\alpha}}, \tag{4}$$

где $b = \eta_1(1 + \tau_2)$; $c = x_0\tau$; $d = \frac{\eta_1}{x_0}$; $e = 1 + \tau_1$; $\tau_1 = \frac{x_1}{x_0}$; $\tau_2 = \frac{x_2'}{x_0}$; $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2$.

Уравнения (2), (3) и (4) представляют собой критериальную форму записи уравнений действующих величин I , Φ , M и являются критериями подобия. В случае полного подобия для машины-оригинала и машины-модели эти функции идентичны. При неполном и приближенном подобии критериальная форма записи позволяет произвести оценку погрешности и осуществить пересчет результатов эксперимента, полученных на модели, на натуральный образец. Действительно, выражение для определения момента вращения машины-оригинала имеет вид:

$$M_O = M_{\bar{\sigma}O} \gamma_O^2 F_{MO}(\alpha_O, \beta_O) \tag{5}$$

и соответственно модели

$$M_M = M_{\bar{\sigma}M} \gamma_M^2 F_{MM}(\alpha_M, \beta_M). \tag{6}$$

Разделив выражение (5) на выражение (6), получим:

$$\frac{M_O}{M_M} = \frac{M\bar{\sigma}_O \gamma_O^2 F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)}{M\bar{\sigma}_M \gamma_M^2 F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)},$$

откуда в общем виде

$$M_O = M_M \frac{M\bar{\sigma}_O \gamma_O^2 F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)}{M\bar{\sigma}_M \gamma_M^2 F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)}. \quad (7)$$

Аналогичные выражения могут быть легко получены и для других величин, характеризующих работу АД.

Так, для тока статора

$$I_{IO} = I_{IM} \frac{I_{\dot{\alpha}O} \gamma_O F_{IO}(\alpha_O, \beta_O)}{I_{\dot{\alpha}M} \gamma_M F_{IM}(\alpha_M, \beta_M)} \quad (8)$$

и магнитного потока

$$\hat{\sigma}_O = \hat{\sigma}_M \frac{\hat{\sigma}_{\dot{\alpha}O} \gamma_O F_{\hat{\sigma}O}(\alpha_O, \beta_O)}{\hat{\sigma}_{\dot{\alpha}M} \gamma_M F_{\hat{\sigma}M}(\alpha_M, \beta_M)}. \quad (9)$$

По формулам (7), (8), (9) можно осуществить пересчет результатов эксперимента, полученных на машине-модели на машину-оригинал при работе в квазистационарных режимах. При этом в общем случае $\gamma_O \neq \gamma_M$; $\alpha_O \neq \alpha_M$; $\beta_O \neq \beta_M$.

На стенде электродинамической модели тягового привода локомотива, который разработан и смонтирован в лаборатории кафедры "Локомотивы" БГТУ использованы асинхронные электродвигатели общепромышленного назначения типа АО-63-4.

Параметры электродвигателя АО-63-4 (машина-модель): $U_{IH} = 220\text{В}$; $I_{IH} = 27,4\text{ А}$; $P_H = 14\text{ кВт}$; $\eta = 0,885$; $\cos\varphi = 0,88$; $2p = 4$; $f_{IH} = 50\text{ Гц}$; $x_0 = 22,26\text{ Ом}$; $x_1 = 0,174\text{ Ом}$; $x'_2 = 0,779\text{ Ом}$; $r_1 = 0,219\text{ Ом}$; $r'_2 = 0,164\text{ Ом}$.

В качестве примера машиной-оригиналом выбран тепловозный электродвигатель ЭД-900.

Параметры электродвигателя ЭД-900: $U_{IH} = 362\text{ В}$; $I_{IH} = 432\text{ А}$; $P_H = 380\text{ кВт}$; $\eta = 0,910$; $\cos\varphi = 0,835$; $2p = 6$; $f_{IH} = 24\text{ Гц}$; $x_0 = 2,7\text{ Ом}$; $x_1 = 0,114\text{ Ом}$; $x'_2 = 0,119\text{ Ом}$; $r_1 = 0,0347\text{ Ом}$; $r'_2 = 0,0304\text{ Ом}$. Номинальную величину относительного параметра скольжения β_H и частоту скольжения f_{2H} определяем следующим образом.

$$\text{В номинальном режиме: } \alpha_H = 1, \gamma_H = 1, \frac{I_1}{I_{1\sigma}} = 1.$$

Подставляя эти значения в формулу (1) и решая ее относительно β , находим величину β_H . Для рассматриваемых двигателей имеем:

Машина-модель (АО-63-4): $\beta_{HM} = 0,02$; $f_{2HM} = \beta_{HM} f_{1HM} = 1\text{ Гц}$.

Машина-оригинал (ЭД-900): $\beta_{HO} = 0,0323$; $f_{2HO} = 0,775\text{ Гц}$.

Базовая величина момента вращения электродвигателя АО-63-4

$$M_{\bar{\sigma}M} = \frac{3U_{1HM} I_{1HM}}{\omega_{1HM}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 27,4}{157} = 115,18\text{ Нм},$$

электродвигателя ЭД-900

$$M_{\bar{\sigma}O} = \frac{3U_{1HO} I_{1HO}}{\omega_{1HO}} = \frac{3 \cdot 362 \cdot 432}{50,24} = 9338,2\text{ Нм}.$$

В таблице 1 приведены относительные значения параметров машин. При полном подобии значения относительных величин для машины-модели и машины-оригинала были бы равны. В нашем случае полное подобие отсутствует.

Таблица 1 – Относительные значения параметров машин

Тип двигателя	$\frac{x_1}{x_0}$	$\frac{x_2}{x_0}$	$\frac{r_1}{x_0}$	$\frac{r_2}{x_0}$	$\frac{x_1}{x_2}$	$\frac{r_1}{r_2}$	$\frac{x_1}{r_1}$	$\frac{x_2}{r_1}$	$\frac{x_1}{r_2}$
АО-63-4	0,032	0,035	0,0098	0,0074	0,917	1,33	3,26	3,557	4,35
ЭД-900	0,042	0,044	0,0112	0,0112	0,958	1,14	3,28	3,429	3,75

В таблице 2 приведены расчетные значения функции $F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)$ двигателя АО-63-4, а в таблице 3 аналогичные значения функции $F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)$ (двигатель ЭД-900). Функции $F_M(\alpha, \beta)$ рассчитаны по формуле (4).

Таблица 2 – Расчетные значения функции $F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)$

f_2	α_M β_M	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)$								
0,5	0,01	113,93	35,751	10,075	4,671	2,673	1,736	1,21
1,0	0,02	156,278	57,018	17,643	8,447	4,936	3,241	2,27
1,5	0,03	169,657	69,240	22,156	11,446	6,793	4,493	3,17
2,0	0,04	170,604	79,906	27,615	13,680	8,230	5,502	3,90

Таблица 3 – Расчетные значения функции $F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)$

f_2	α_O β_O	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)$								
0,24	0,01	65,8	20,73	5,65	2,69	1,49	0,96	0,69
0,48	0,02	95	33,52	10,12	4,8	2,79	1,82	1,32
0,72	0,03	106,96	41,88	13,56	6,61	3,899	2,56	1,87
0,96	0,04	110,5	47,01	16,16	8,06	4,81	3,19	2,34

По данным таблиц 2 и 3 строятся графики $F_M(\alpha, \beta)$, которые используются для определения конкретных значений функций $F_{MO}(\alpha_O, \beta_O)$ и $F_{MM}(\alpha_M, \beta_M)$ при заданных значениях α_O, β_O и α_M, β_M .

Оценим величину погрешности, получаемую при приближенном моделировании двигателя ЭД-900 двигателем АО-63-4. Оценку произведем по величине момента на валу электродвигателя, поскольку эта величина является наиболее характерной. На рисунке 2, а приведены осциллографические записи усилия в реактивной тяге (УРТ) - УРТ подвески двигателя к раме тележки и момента на полом валу – $M_{п.в}$ тягового привода, а на рисунке 2, б – осциллографические записи выпрямленного напряжения – U_d и фазового тока – I_ϕ электродвигателя ЭД-900.

В приведенном выше режиме работы: $\alpha_O = 0,12$, $\beta_O = 0,029$, $\gamma_O = 0,0135$, а момент двигателя, полученный при испытаниях – $\overline{M}_{дв.о.и}$ равен 5600 Нм.

На рисунке 3, а приведены осциллографические записи момента на валу двигателя – $\overline{M}_{дв.м}$, выпрямленного – U_d и фазового – U_ϕ напряжений электродвигателя АО-63-4.

В приведенном режиме работы: $\alpha_M = 0,058$; $\beta_M = 0,01388$; $\gamma_M = 0,06$, а момент двигателя $\overline{M}_{дв.м}$ полученный при испытаниях на стенде, равен 35 Нм.

Оценим величину погрешности в случае $\gamma_O \neq \gamma_M$; $\alpha_O \neq \alpha_M$; $\beta_O \neq \beta_M$.

Для этого, используя графики (рис. 2, 3) и формулы (5), (6), вычислим значение момента $\overline{M}_{дв.о}$ на валу двигателя ЭД-900 и сравним со значением $\overline{M}_{дв.о.и}$, полученным при испытаниях.

При расчете по формуле (7) величина $\overline{M}_{дв.о}$ равна 4210 Нм. Погрешность ΔM определяем по формуле:

$$\Delta M = \left| \frac{\overline{M}_{дв.о.и} - \overline{M}_{дв.о}}{\overline{M}_{дв.о.и}} \right| \cdot 100\% .$$

Таким образом, в данном примере $\Delta M = 24,8\%$. Произведем оценку погрешности в случае, когда $\gamma_O = \gamma_M$; $\alpha_O = \alpha_M$; $\beta_O = \beta_M$.

На рисунке 3, б приведены осциллографические записи момента на валу двигателя $\overline{M}_{дв.м}$, выпрямленного U_d и фазового U_ϕ напряжений электродвигателя АО-63-4, работающего в режиме близком к режиму работы двигателя ЭД-900. В этом случае: $\alpha_M = 0,11$; $\beta_M = 0,0275$; $\gamma_M = 0,135$; момент $\overline{M}_{дв.м}$ равен 100 Нм. Величина $\overline{M}_{дв.о}$, полученная по формуле (7), равна 4840 Нм. Погрешность в этом случае равна $\Delta M = 13,5\%$.

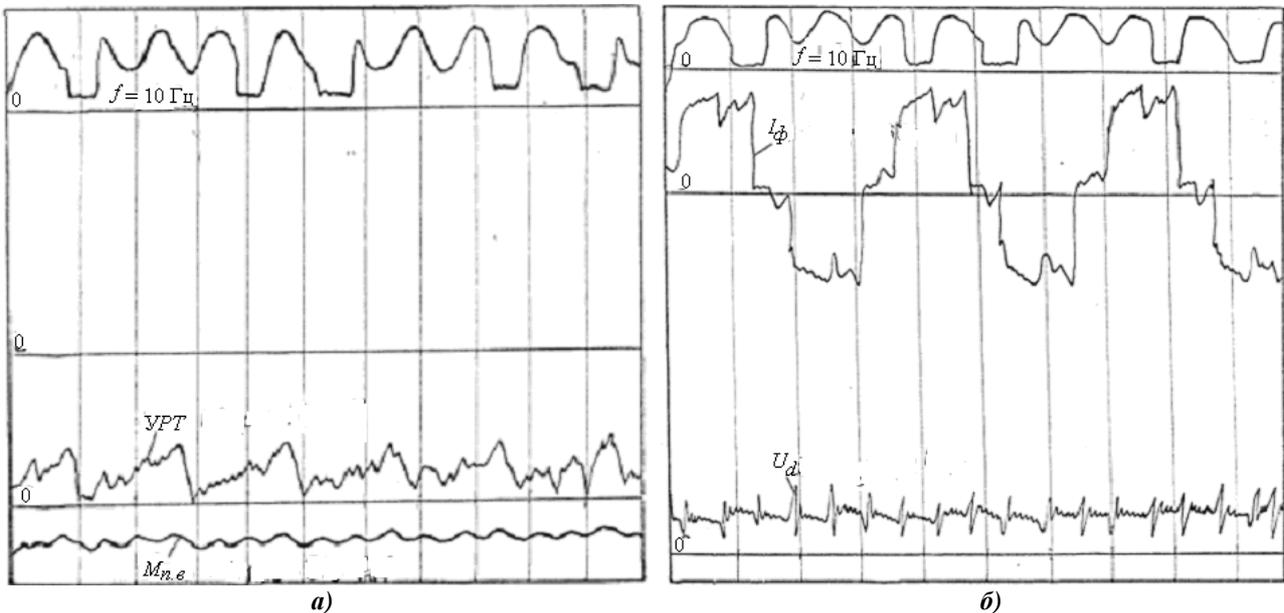


Рисунок 2 – Осциллограммы динамических процессов в тяговом приводе с двигателем ЭД-900

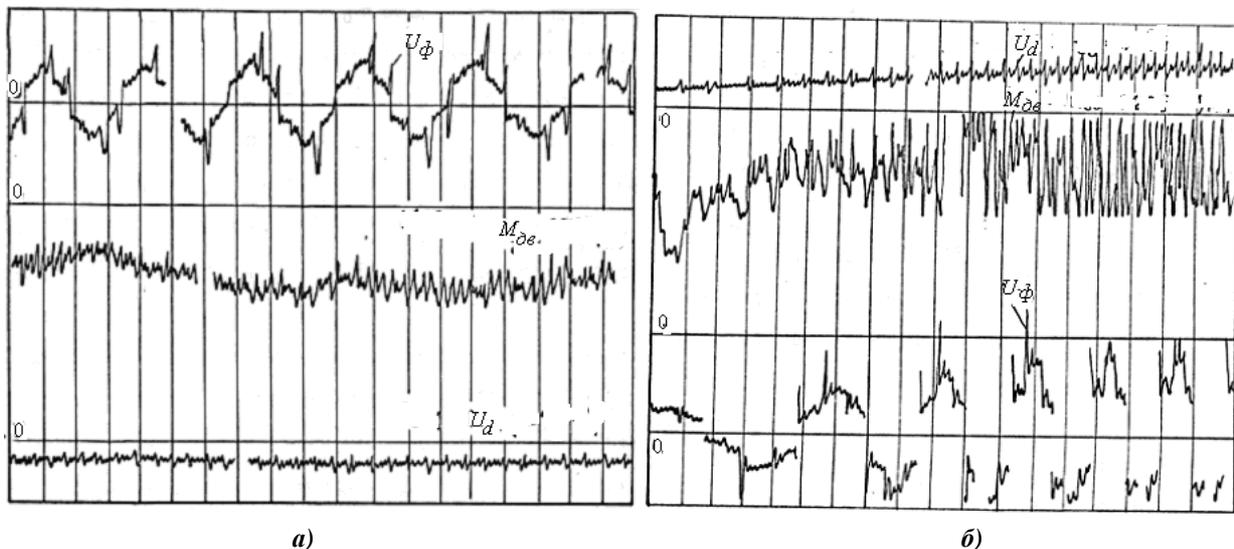


Рисунок 3 – Осциллограммы процессов, полученных на физической модели привода

Так как относительная величина пульсации момента в значительной степени зависит от параметров α , γ и β , то для сохранения количественной и качественной стороны этого процесса, желательно, чтобы $\gamma_O = \gamma_M$; $\alpha_O = \alpha_M$; $\beta_O = \beta_M$. Сравним величину относительной пульсации δM момента на валу двигателя ЭД-900 (рис. 2, а) с величиной пульсации момента у двигателя АО-63-4 (рис. 3, б) определяемых по формуле:

$$\delta M = \left| \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2M_{cp}} \right| \cdot 100\% .$$

Для двигателя ЭД-900 $\delta M = 46\%$, для двигателя АО-63-4 $\delta M = 56\%$. Погрешность в определении величины пульсаций момента не превышает 13%.

В вышеприведенных расчетах $\overline{M}_{дв.о.и}$ и $\overline{M}_{дв.м}$ – среднестатистические значения моментов на валу двигателя ЭД-900 и двигателя АО-63-4, полученные в результате многократных натурных и стендовых испытаний.

Таким образом, можно осуществлять приближенное моделирование асинхронного тягового двигателя двигателем общепромышленного назначения с достаточной степенью точности. Погрешность в определении количественной величины момента даже в случае несовпадения режимов работы двигателей не превышает 25% (качественная картина процесса пульсаций момента полностью сохраняется), а в случае близости режимов работы, погрешность не превышает 14%. В случае совпадения режимов работы погрешность в количественном соотношении не превышает 13%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] : учебное пособие для вузов / В. А. Веников. – М.: Высш. Школ, 1976. – 479 с.
2. Воробьев, В. И. Исследование динамических процессов в тяговом приводе локомотива с асинхронным двигателем в режимах пуска, разгона и движения с низкими скоростями [Текст] / В. И. Воробьев: Дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 1981. – 183 с.
3. Космодамианский, А. С. Стенд для исследования систем охлаждения тяговых асинхронных двигателей [Текст] / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – 2011. – С. 214 - 221.
4. Физический эксперимент и моделирование в машиностроении [Текст] : монография / О. В. Измеров [и др.] – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 452 с.
5. Космодамианский, А. С. Экспериментальная установка для исследования и регулирования процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя [Текст] / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – Новочеркасск, 2011. – № 2 (62). – С. 65 - 76.
6. Комплексная установка для совместного исследования электромеханических и тепловых процессов в электроприводе с асинхронным двигателем [Текст] / А. С. Космодамианский, [и др.] // XII Всемирный электротехнический конгресс: сборник тезисов. – Москва, 4 - 5 октября 2011. – С. 70 - 71.
7. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский – М.: Энергия, 1969. – 303 с.
8. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями [Текст] / А. А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
9. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов [Текст] / В. И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

Космодамианский Андрей Сергеевич

Российская открытая академия транспорта (филиал МГУПС) (РОАТ МИИТ), г. Москва
Д-р техн. наук, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав»
E-mail: askosm@yandex.ru

Воробьев Владимир Иванович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Канд. техн. наук, доц. каф. «Локомотивы»
Тел: (4832) 56-02-61

Пугачев Александр Анатольевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Канд. техн. наук, доц. каф. «ЭРЭиЭС»

Тел: (4832) 56-36-02

E-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

A.S. KOSMODAMIANSKIY, V.I. VOROBYEV, A.A. PUGACHEV

RESEARCH OF TRACTION ASYNCHRONOUS MACHINE ELECTROMECHANICAL PERFORMANCES BY DIMENSION ANALYSIS TECHNIQUE

The researches possibility of electromechanical performances of traction asynchronous machine by using test bed electric drive with the lesser power is proved by means dimension analysis technique of the similarity and simulation theory. The numerical indexes of this simulation errors are represented.

Keywords: asynchronous machine, traction electric drive, frequency control, full-scale and test bed experiments, similarity relations

BIBLIOGRAPHY

1. Venikov, V. A. Theory of similarity and modeling (as applied to electricity) [text]: a manual for schools / V.A. Venikov. - M.: Higher School, 1976. - 479 p.
2. Vorobiev, V.I. Investigation of dynamic processes in the traction drive locomotive with asynchronous-tion start mode, acceleration and a lower speed [Text] / V.I. Vorobiev: Dis. ... Candidate. tech. Science. - Bryansk, 1981. - 183 p.
3. Kosmodamianskii, A.S. Booth to investigate cooling of asynchronous traction engines [Text] / A.S. Kosmodamianskii, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // Improvement of power machines: Collection of scientific works. - 2011. - P. 214 - 221.
4. Physical experiment and simulation in engineering [text]: monograph / O.V. Izmerov [etc.] - Orel: OrelGTU, 2009. - 452 p.
5. Kosmodamianskii, A.S. Experimental setup for the investigation and management of processes of heating and cooling of asynchronous motor [Text] / A.S. Kosmodamianskii, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev // Bulletin of the Russian Research and Design designing institute electric locomotive. - Novochoerkassk, 2011. - № 2 (62). - P. 65 - 76.
6. Integrated system for the joint study of electromechanical and thermal processes in the electric drive with induction motor [Text] / A.S. Kosmodamianskii, [etc.] // XII World Congress of electric trotehnicheskyy: book of abstracts. - Moscow, October 4 - 5, 2011. - P. 70 - 71.
7. Ivanov-Smolensky, A.V. Electromagnetic fields and processes in electrical machines and their physically modeling [Text] / A.V. Ivanov-Smolensky - Moscow: Energy, 1969. - 303 p.
8. Usoltsev A.A. Frequency controlled induction motors [Text] / A.A. Usoltsev. - St. Petersburg St. Petersburg State University of Information Technologies, 2006. - 94 p.
9. Cliuchev, V. I. Theory of electric: a textbook for high schools [Text] / V. I. Cliuchev - M.: Energoatomizdat, 2001. - 704 p.

Kosmodamianskiy Andrey Sergeevich

Russian Open Transport Academy (MSUT branch)

Doctorate in Engineering, Professor, Head of the Department "Tractive Stock",

E-mail: askosm@mail.ru

Vorobyev Vladimir Ivanovich

Bryansk State Technical University

PhD Engineering, Assistant Prof, Assistant Prof of the Department "Locomotives",

Phone: (4832) 56-02-61

Pugachev Alexander Anatolievich

Bryansk State Technical University

PhD Engineering, Assistant Prof. of the Department "Electronic, Radioelectronic and Electrical Engineering Systems"

Phone: (4832) 56-36-02,

E-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.5

О.В. АНИКЕЕВА

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТРМ НА ОСНОВЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ

В работе рассмотрены вопросы обеспечения технологической надежности металлорежущих станков. Предложен метод обеспечения технологической надежности металлорежущих станков, поддерживающий внедрение системы ТРМ на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: ТРМ; металлорежущие станки; надежность.

Физически изношенное технологическое оборудование требует существенных затрат для обеспечения точности обрабатываемых на нем деталей, имея при этом достаточно низкую производительность. Затраты, главным образом, обусловлены проведением технического обслуживания и ремонта оборудования.

Широкое распространение на предприятиях различных отраслей получила система ТРМ (Total Productive Maintenance), целью которой является создание организации, которая постоянно стремится к предельному и комплексному повышению эффективности производственной системы. При этом перед предприятиями, несмотря на большое число источников информации об удачных примерах внедрения системы, возникает главная проблема достижения поставленной цели – определение параметров фактического состояния оборудования и прогнозирование их изменения при эксплуатации.

В работе предложен метод обеспечения технологической надежности металлорежущих станков (МРС) (рис. 1), поддерживающий внедрение системы ТРМ на машиностроительных предприятиях. Использование метода обеспечивает получение информации об узлах станка, требующих ремонта, с минимальными затратами, т.е. позволяет управлять технологическим оборудованием по его фактическому техническому состоянию – на этапе эксплуатации технологического оборудования. Кроме того, предприятие сможет предупредить отклонение точности технологического оборудования от требуемого уровня, тем самым максимально снизив вероятность изготовления бракованных изделий.

Метод обеспечения технологической надежности МРС решает задачи:

- поддержания работоспособности МРС;
- повышения прозрачности затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) и истории эксплуатации МРС;
- повышения эффективности использования МРС;
- обеспечения производительности, выполнения производственного плана;
- повышения или обеспечение необходимого уровня надежности;
- повышения эффективности работы ремонтных работников;
- оптимизации затрат на материально-техническое обеспечение ТОиР;
- управления запасами для ТОиР;
- обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию.

Предложенный метод соответствует требованиям поэтапного внедрения системы ТРМ, так как позволяет:

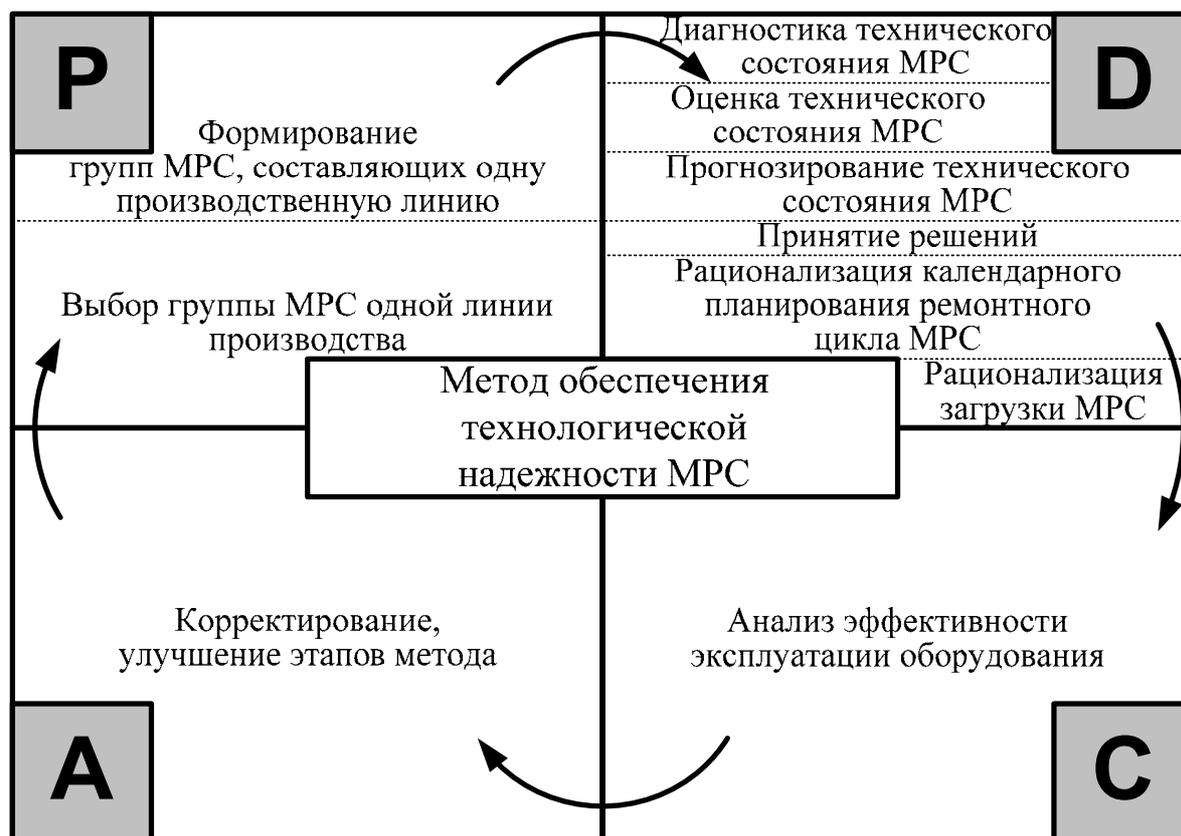


Рисунок 1 – Метод обеспечения технологической надежности MPC

- 1) определить: взаимосвязь параметров точности изделия с параметрами точности оборудования, причины отклонений параметров точности изделий, последствия дефектов узлов оборудования;
- 2) идентифицировать состояние узлов оборудования;
- 3) определить возможность возникновения дефекта;
- 4) разработать и реализовать меры по устранению причин отклонений точности оборудования от требуемой;
- 5) оптимизировать процесс обслуживания оборудования;
- 6) повысить уровень знаний рабочих-ремонтников оборудования посредством обучения.

Метод обеспечения технологической надежности MPC реализует цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act): на этапе **планирования** происходит формирование групп MPC, составляющих одну производственную линию, затем выбирается группа MPC конкретной производственной линии, техническое состояние технологического оборудования которой необходимо оценивать.

На этапе **выполнения работ** необходимо провести процесс технической диагностики выбранной группы MPC. В данном случае техническая диагностика должна решить задачи диагноза (определения состояния, в котором в настоящий момент находится оборудование) и прогноза (предсказание состояния, в котором окажется оборудование в будущий момент времени) [1].

В работе [2] предложен и подробно рассмотрен метод функциональной диагностики MPC (рис. 2), основанный на вариационном методе расчета точности MPC [3].

В работе [4] предложена тестовая деталь, предназначенная для контроля параметров геометрической точности токарных и фрезерных станков (рис. 3).

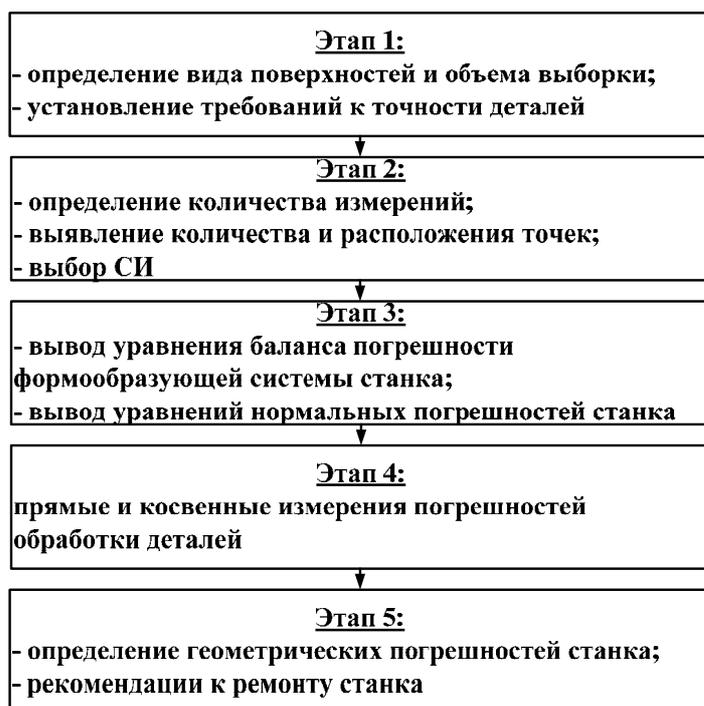


Рисунок 2 – Схема функциональной диагностики MPC

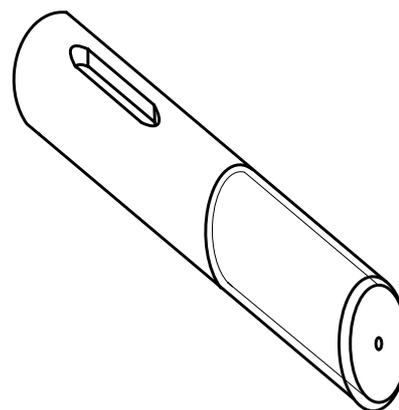


Рисунок 3 – Эскиз тестовой детали

Таким образом, после проведения процесса диагностики технологического оборудования, необходимо оценить его фактическое техническое состояние. При этом особо важным является процесс прогнозирования состояния станка в будущем (рис. 4).

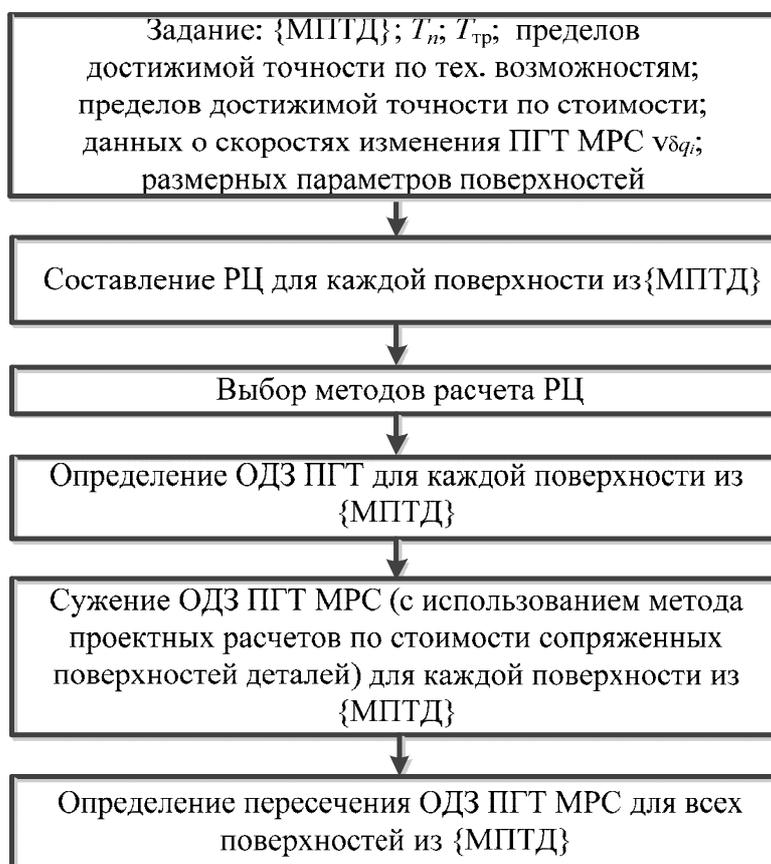


Рисунок 4 – Процесс прогнозирования состояния MPC

Первый этап процесса включает в себя задание исходных данных: множество поверхностей, необходимых для технической диагностики (МПТД), задается балансами технологической точности поверхностей, обрабатываемых на МРС [3]; T_n – отклонение размера n -ой поверхности из {МПТД} после обработки на МРС, обусловленное геометрическими погрешностями МРС; T_{mp} – необходимое время работы МРС; пределы достижимой точности δq_i параметров геометрической точности (ПГТ) формообразующих узлов станка исходя из технических возможностей; пределы достижимой точности ПГТ формообразующих узлов станка исходя из затрат по их достижению; $v\delta q_i$ – скорости изменения значений ПГТ формообразующих узлов станка; размерные параметры обрабатываемых на станках поверхностей.

Второй этап включает составление размерной цепи (РЦ) для каждой из поверхностей из всего МПТД. При этом составляющими звеньями размерной цепи будут являться ПГТ δq_i формообразующих узлов МРС, замыкающим звеном – отклонение T_n .

На третьем этапе происходит выбор методов расчета размерной цепи, составленной на втором этапе [5].

На четвертом этапе определяется область допустимых значений (ОДЗ) ПГТ МРС для каждой из поверхностей из МПТД при известных T_{mp} и $v\delta q_i$ из выражения:

$$\delta q_{i\epsilon} = \delta q_{ii} + v\delta q_i \cdot T_{\delta} \delta, \quad (1)$$

где δq_{ik} – конечные значения ПГТ МРС;

δq_{ii} – начальные значения ПГТ МРС.

Пятый этап включает в себя сужение ОДЗ ПГТ МРС с использованием метода проектных расчетов по стоимости сопряженных поверхностей деталей для каждой поверхности из МПТД или с помощью заданных на первом этапе пределов достижимой точности ПГТ формообразующих узлов станка исходя из затрат по их достижению.

На шестом этапе определяются пересечения ОДЗ ПГТ МРС всех поверхностей из МПТД.

Таким образом, результатами процесса прогнозирования являются начальные значения и ОДЗ ПГТ МРС.

После получения результатов процессов диагностирования и прогнозирования руководство предприятия должно принять решение о дальнейшем использовании конкретного МРС. При этом необходимо провести процессы рационализации загрузки и календарного планирования ремонтного цикла МРС.

Проведенные на базе ОАО «Курский завод Маяк» практические исследования показали, что график ремонтного цикла МРС, выпущенных с 1967г., имеет вид: К-О₁-М₁-О₂-М₂-О₃-С-О₄-М₃-О₅-М₄-О₆-М₅-О₇-М₆-О₈-К (К,М,С – капитальный, текущий, средний ремонт, О – осмотр). Утвержденный и действующий ремонтный цикл соответствует разработанному циклу для МРС (весом до 10 т, выпускаемых с 1967г.), входящему в Единую систему плано-предупредительного ремонта [6]. При этом продолжительность t_{MP1} межремонтного периода и продолжительность $t_{Э1}$ эксплуатации постоянны. В таком случае велика вероятность возникновения ошибок первого и второго рода, когда ремонту будет подлежать оборудование, не израсходовавшее свой ресурс точности, или возникнет необходимость проведения внепланового ремонта.

Метод обеспечения технологической надежности МРС снижает вероятности таких ошибок, т.к. позволяет осуществлять ремонт оборудования по его фактическому техническому состоянию (рис. 5).

При этом каждый процесс эксплуатации для МРС на ОАО «Курский завод Маяк» будет включать в себя этапы диагностики и прогнозирования состояния МРС. Указанные этапы не требуют остановки и простоя станка; затраты времени на их выполнение состоят лишь в изготовлении тестовой детали (не более 15 мин), измерении ее геометрических параметров, диагностики и прогнозирования состояния МРС в автоматическом режиме [7,8].

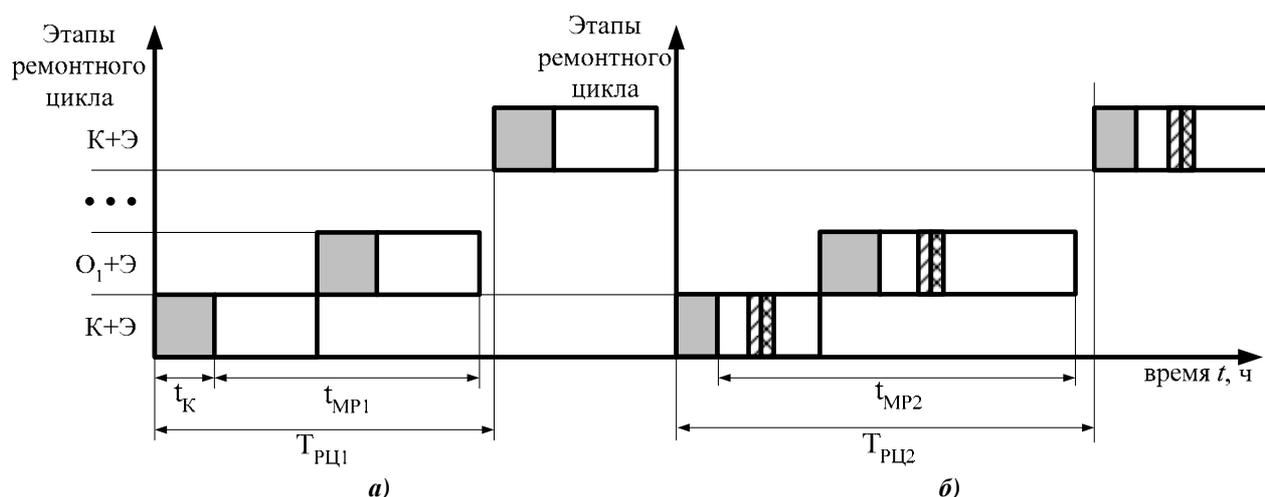


Рисунок 5 – График ремонтных циклов МРС на ОАО «Курский завод Маяк»:
 а) действующий ремонтный цикл; б) ремонтный цикл по предложенному методу;
 ■: капитальный, текущий, средний ремонт, осмотр; □ – эксплуатация;
 t_K – продолжительность капитального ремонта, ч; $T_{РЦ}$ – продолжительность РЦ, ч.

Результаты проведенных этапов могут быть следующими:

- МРС работоспособен (не исчерпал свой точностной ресурс) и будет таковым в течении n часов: в этом случае возможен перенос даты очередного запланированного ремонта (ранее или позднее) или его исключение);

- МРС неработоспособен (исчерпал свой точностной ресурс): в этом случае необходим внеплановый ремонт или принятие решения перевода МРС на линию, выпускающую менее точные изделия.

Кроме того, в результате проведенной диагностики, сократятся затраты времени на капитальные, текущие, средние ремонты и осмотры МРС. Указанные факторы являются причиной непостоянства продолжительности эксплуатации: $t'_{Э} > t_{Э}$ или $t'_{Э} < t_{Э}$.

В первом случае обеспечивается производительность и выполнение производственного плана МРС предприятия, во втором случае повышается эффективность использования оборудования на предприятии. Но в любом случае снижается вероятность изготовления бракованных изделий, что влечет за собой снижение затрат, связанных с производственным браком (в т. ч. и рекламации).

На этапе **контроля** необходимо проанализировать эффективность эксплуатации оборудования. Для этого необходимо определить следующие показатели:

- среднее время наработки между капитальными ремонтами, ч;
- среднее время восстановления, ч;
- среднее число отказов и ремонтов;
- длительность простоев, связанных с поломками и ремонтами, ч.

На этапе **регулирования** необходимо провести корректировку этапов метода обеспечения технологической надежности МРС с целью улучшения его показателей.

Экспериментальные исследования проводились на базе ОАО «Курский завод Маяк» и ЗАО «Курский электроаппаратный завод». На станках УТ16В и 676П при режимах соответственно $s_1=0,16$ мм/об, $n_1=630$ мин⁻¹ и $s_2=125$ мм/мин, $n_2=1120$ мин⁻¹ была изготовлена тестовая деталь (рис. 6).

Для диагностики состояния УТ16В были проведены измерения значений отклонений профиля поперечного сечения цилиндрической поверхности детали от круглости в десяти сечениях. На рисунке 7 представлены профили цилиндрической поверхности тестовой детали.

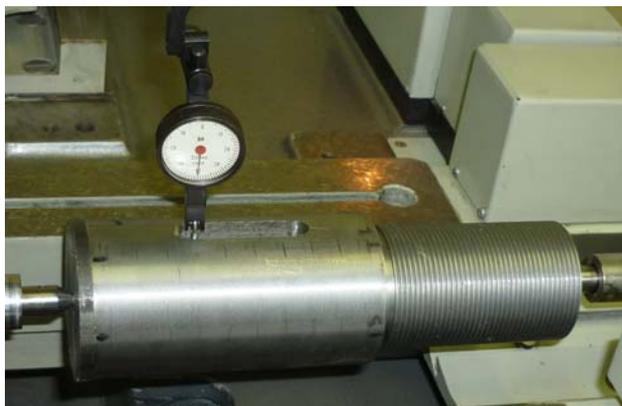


Рисунок 6 – Тестовая деталь

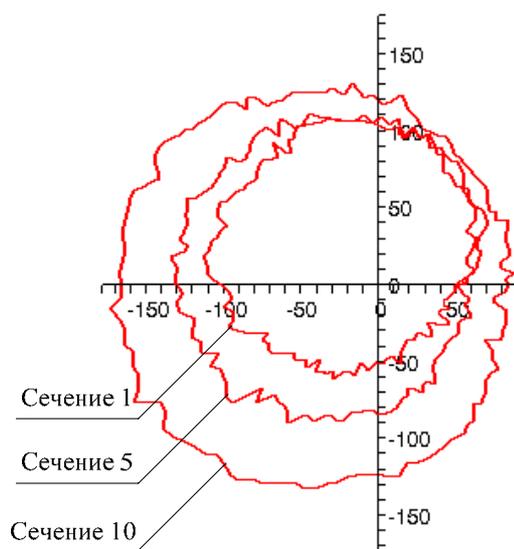


Рисунок 7 – Профили цилиндрической поверхности тестовой детали в сечениях

Для увеличения точности результатов диагностики необходимо максимально исключить воздействие колебаний и упругих деформаций на процесс обработки, т.е. выбрать такие режимы резания МРС, которые максимально исключают указанные влияния.

Анализ предварительных результатов позволил:

- обосновать выбор режимов резания при обработке тестовой детали, обеспечивающих снижение влияния колебаний на результаты диагностики параметров геометрической точности МРС;
- проверить и отладить методики измерений и программного обеспечения.

После данного этапа исследований начата апробация метода, в т.ч. реализация системы ТРМ на предприятиях г. Курска (ОАО «Курский завод Маяк», ЗАО «Курский электроаппаратный завод») и Курской области (ОАО «Геомаш», г. Щигры), предварительные результаты которой показывают, что решены задачи: поддержания работоспособности МРС, повышения эффективности их использования МРС, обеспечения производительности, выполнения производственного плана, повышения необходимого уровня надежности, обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию.

Работа выполнялась в соответствии с ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И. А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. - М. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
2. Анисеева, О. В. Организация функциональной диагностики металлорежущих станков [Текст] / О. В. Анисеева, А. Г. Ивахненко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 2/3 (286). – С. 133-138.
3. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков [Текст] / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
4. Анисеева, О. В. Контроль параметров геометрической точности металлорежущих станков при их функциональной диагностике [Текст] / О. В. Анисеева // *Материалы Всероссийской конференции научной молодежи «ЭРЭЛ-2011» в 2 т. Т.1.* – Якутск, 2011. – С. 56-59.
5. Булатов, В. П. Расчет точности машин и приборов [Текст] / В. П. Булатов, И. Г. Фриндлендер, А. П. Баталов [и др.] / Под общ. ред. В. П. Булатова и И. Г. Фриндлендера. – СПб. : Политехника, 1993. – 495 с.
6. Яковсон, М. О. Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий [Текст] / М. О. Яковсон. – М. : Машиностроение, 1967. – 592 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Диагностика токарно-винторезного станка при обработке цилиндрических, торцовых и винтовых поверхностей. № 2011613642 [Текст] / О. В. Анисеева, А. Г. Ивахненко. 11.05.2011 г.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Диагностика вертикально-фрезерного станка при обработке закрытого шпоночного паза. № 2011615190 [Текст] / О. В. Аникеева. 01.07.2011 г.

Аникеева Олеся Владимировна

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Аспирант кафедры управления качеством, метрологии и сертификации

Тел: (4712) 32-61-00

E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

O.V. ANIKEEVA

REALIZATION OF A TPM SYSTEM ON BASIS OF A TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF MACHINE TOOLS SECURING

In work questions are considered of a technological reliability of metal cutting machine tools securing. The method of a technological reliability of metal cutting machine tools securing supporting the implementation of a system TPM in machine-building enterprises is introduced.

Keywords: TPM; metal cutting machine tools; reliability.

BIBLIOGRAPHY

1. Birger, I.A. Technical diagnostic [Text] I.A. Birger – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 240 p.
2. Anikeeva, O.V. Organization of a functional diagnostics of metal cutting machine tools [Text] / O.V. Anikeeva, A.G. Ivakhnenko // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. – 2011. - № 2/3 (286). – Pp. 133-138.
3. Reshetov, D.N. Precision of metal cutting machine tools [Text] / D.N.Reshetov, V.T. Portman – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336 p.
4. Anikeeva, O.V. Control of geometric relationship of metal-cutting machine tools' characteristics as their functional diagnostics [Text] // Materials of a All-Russian scientific young people conference «EREL-2011» bipartite. V.1. – Yakutsk, 2011. – Pp. 56-59.
5. Bylatov, V.P. Calculating of machines' and devices' precision [Text]/ V.P. Bylatov, I.G. Frindlender, A.P. Batalov, etc / Under, V.P. Bylatov and I.G. Frindlender. – St. Petersburg: Polytechnika, 1993. – 495 p.
6. Yacobson, M.O. Unified system for preventative maintenance and efficient operation of process equipment engineering companies [Text]. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 592 p.
7. Anikeeva, O.V., Ivakhnenko, A.G. Registration Certificate 2011613642 for a Computer Program.
8. Anikeeva, O.V. Registration Certificate 2011615190 for a Computer Program.

Anikeeva Olesya Vladimirovna

Southwest State University, Kursk

The post-graduate student of Quality Management, Metrology and Certification department

Phone: (4712) 32-61-00

E-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

И.А. АНТАМОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поставлена задача определения усилий и напряжений в конструкциях с зубчатыми колесами. Рассмотрена методика выполнения прочностных расчетов таких конструкций с применением численного метода - метода конечных элементов. Приведены результаты данного вида расчетов, проведенных на блоке шестерен.

Ключевые слова: метод конечных элементов, прочностной расчет, зубчатые колеса, трехмерная модель.

В современном машиностроении особую роль играет расчет на прочность, устойчивость и деформации деталей приводов станков. Главная задача соотношения между расчетом и проектированием – подобрать наиболее подходящие материалы и размеры для элементов конструкции так, чтобы последние надежно выдерживали те нагрузки, которые будут действовать на них во время работы конструкции. Прочностной расчет – один из начальных этапов проектирования конструкции, на котором определяются все возможные, действующие на конструкцию силы. Такой расчет необходим для проектирования безопасной и надежной конструкции. Ошибки в подобных расчетах основных компонентов и запасных частей данного вида оборудования недопустимы, т.к. приводят к неоднократным поломкам и дорогостоящему ремонту станка, а зачастую и браку партии изготавливаемой продукции.

Станок ИЖ250ИТВ в настоящее время один из распространенных на производстве в машиностроительной промышленности. При эксплуатации станка ИЖ250ИТВ на промышленном предприятии ОАО "АК "Туламашзавод" возникла проблема, связанная с одним из блоков шестерен передней бабки станка. Проблема заключается в том, что через некоторое время эксплуатации (порядка 1,5 месяцев) возникает трещина блока в сечении шпонки, которая разрывает блок на две половины, что приводит к необходимости ремонта станка и браку изготавливаемого изделия. Ошибки и погрешности в проектировании и эксплуатации данного станка и подобных ему станков могут привести к ухудшению показателей качества функционирования и как следствие снижению производительности в целом. Поэтому выявление и исправление подобных ошибок и погрешностей современными средствами анализа – актуальная и трудоемкая задача.

Цели работы. Целью данного исследования является повышение производственных мощностей и качества изготавливаемой продукции на предприятиях, эксплуатирующих станок ИЖ250ИТВ и, в частности, промышленного предприятия ОАО "АК "Туламашзавод", а так же нахождение причин поломки блока зубчатых колес станка ИЖ250ИТВ.

Задача исследования. Задача данной работы – исследование усилий и напряжений, возникающих в блоке-двойке зубчатых колес, расположенного в передней бабке станка ИЖ250ИТВ, с использованием современных методик расчета, в частности при помощи метода конечных элементов.

Методы решения задачи. До появления мощных ЭВМ единственным средством оценки физико-механических свойств сложных конструкций были оценочные расчеты с использованием приближенных аналитических или полуэмпирических методик. Точность подобных методик применительно к реальным объектам проектирования обычно невысока, поэтому в конструкцию изделия закладываются значительные коэффициенты запаса, снижающие риск принятия ошибочного проектного решения. В большинстве случаев подобный подход в проектировании остается наиболее распространенным и в настоящее время. Развитие компьютерной техники и появление новых прикладных программ расчетов и моделирования обусловили серьезные изменения традиционных подходов к инженерным исследованиям. На сегодняшний день доминирующим методом численного решения самых

разных физических задач становится метод конечных элементов (МКЭ). Широкий спектр применения и адекватность описания поведения реальных объектов, обеспечили данному методу одно из ведущих мест в прикладной вычислительной математике. Интерес к нему вызван, в первую очередь, возможностью создания на его базе различных прикладных программных комплексов. Это связано с тем, что в МКЭ заданную сложную систему можно разбить на отдельные конечные элементы (некоторые малые области тела в совокупности с заданными в них функциями формы, аппроксимирующими геометрию элемента и неизвестные величины) различной геометрической конфигурации. Метод позволяет детально исследовать напряженно-деформированное состояние таких элементов и с высокой степенью точности охарактеризовать поведение всей конструкции в целом.

Расчеты на прочность. Рассмотрим станок ИЖ250ИТВ, в частности один из блоков передней бабки станка, проведем проверочные расчеты на прочность, упругость и деформации.

Прочность контактных поверхностей зубчатых передач является основным критерием работоспособности передач закрытого типа. Для исследования прочностных характеристик таких конструкций проанализируем усилия возникающие в блоке зубчатых колес, а так же рассмотрим граничные условия, необходимые для корректного моделирования поведения объекта.

Объект исследования. Для выполнения расчета рассмотрим конструктивные особенности исследуемого блока (рис. 1).

- Количество зубьев 1-го зубчатого колеса - $Z1 = 42$
- Количество зубьев 2-го зубчатого колеса - $Z2 = 42$
- Модуль - $m = 1,75$
- Высота зуба - $h = 4$ мм.
- Шаг зубчатого зацепления - $t = 5,495$ мм.
- Делительный диаметр - $Dд = 73,5$ мм.
- Наружный диаметр - $Dе = 77$ мм.
- Ширина обода 1-го зубчатого колеса - $b1 = 9$ мм.
- Ширина обода 2-го зубчатого колеса - $b2 = 9$ мм.
- Материал - Сталь 40Х
- Твердость - HRCэ 19,5...57
- Диаметр отверстия для вала - $d = 25$ мм.
- Высота шпоночного паза - $hш = 4$ мм.
- Ширина шпоночного паза - $bш = 10$ мм.
-

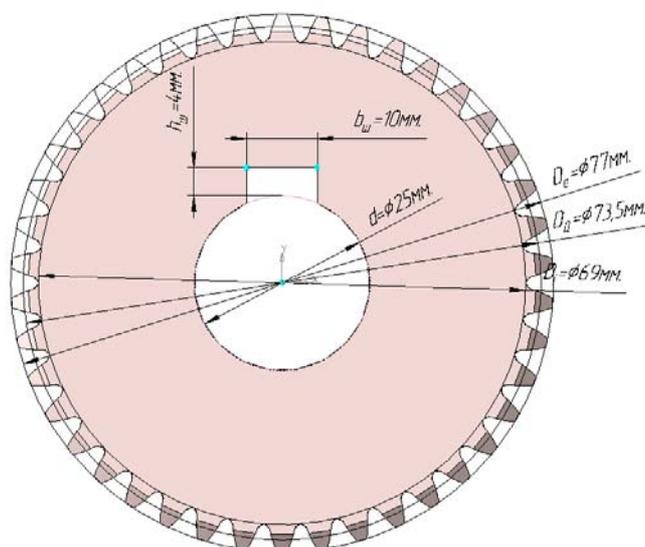


Рисунок 1 – Исследуемый объект

Силы, приложенные к объекту. Выполнив анализ сил, действующих на объект их можно условно разделить по характеру расположения в пространстве силы на сосредоточенные и распределенные. Сосредоточенные силы действуют на элемент конструкции через площадку, размеры которой очень малы по сравнению с размерами всего элемента. При расчетах, для их упрощения, сосредоточенные силы можно принять приложенными в одной точке. Распределенные нагрузки - силы, приложенные на протяжении некоторой длины или площадки конструкции.

Окружная и радиальная силы, действующие в зацеплении на контактную поверхность зуба колеса, представлены на рисунке 2, а и рассчитываются по формулам (1) и (2) соответственно:

$$F_t = \frac{2 \cdot M}{D_d}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент (рис. 2, б);
 D_d – делительный диаметр.

$$F_r = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_w, \quad (2)$$

где α_w – угол зацепления (по ГОСТ 13755-81 $\alpha_w = 20^\circ$).

На стенку шпоночного паза так же действует сила давления шпонки (рис. 2, в), которую можно найти по формуле (3).

$$F_{ш} = \frac{2 \cdot M}{d} \quad (3)$$

где d – диаметр вала.

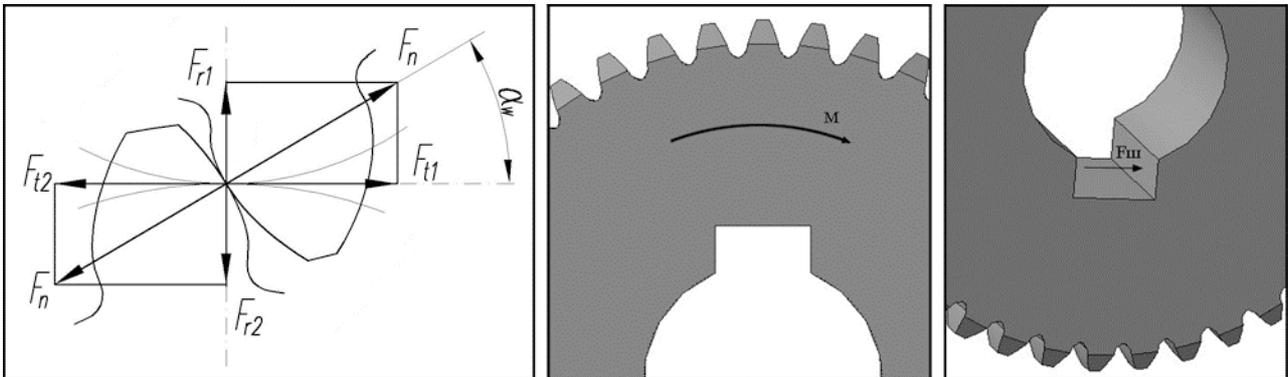


Рисунок 2 – Силы, действующие на зубчатое колесо (слева направо а,б,в)

Таким образом, были рассмотрены силы, возникающие при нагрузках на исследуемый блок.

Граничные условия. Исходя из конструктивных особенностей передней бабки станка ИЖ250ИТВ в целом и рассматриваемого блока шестерен в частности, можно выделить ряд граничных условий. В качестве способа крепления объекта, можно выбрать соединение типа «подвижный шарнир», подразумевающий возможность вращения блока вокруг своей оси. Следует исключить из системы любые движения, не предусмотренные конструкцией, например, целесообразно боковое фиксирование блока, имитирующее упорное кольцо. Так же модули всех действующих на блок сил следует ограничить расчетными значениями.

Конечно-элементная сетка. При моделировании объекта блок был разбит на сеть конечных элементов со следующими параметрами:

- Тип разбиения - на основе кривизны
- Максимальный размер элемента - 8,26421 мм.
- Минимальный размер элемента - 1,65284 мм.

- Всего узлов - 54043
- Всего элементов - 32027
- Максимальное соотношение сторон - 13,3
- Элементов с соотношением сторон < 3 - 78,3
- Элементов с соотношением сторон > 10 - 0,294

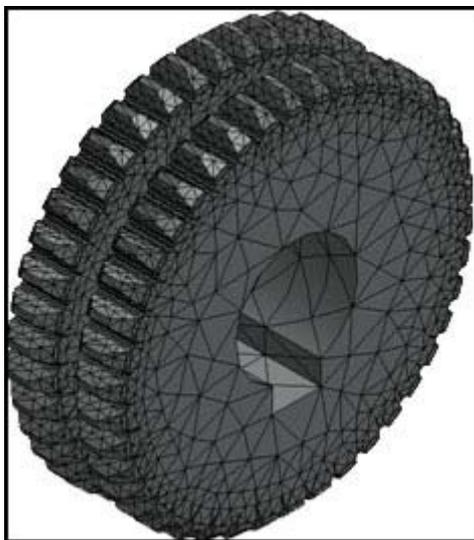


Рисунок 3 – Конечно-элементная сетка

Характеристики материала. Для моделирования корректного поведения конструкции необходимым условием является определение правильных характеристик материала объекта. При изготовлении рассматриваемого блока зубчатых колес, материалом указанным в конструкторской документации является сталь 40Х ГОСТ 4543-71 со следующими параметрами:

- Предел текучести: 780 МПа
- Предел прочности при растяжении: 980 МПа
- Модуль упругости: 214000 МПа
- Коэффициент Пуассона: 0.26
- Массовая плотность: 7850 кг/м³
- Модуль сдвига: 85000 МПа

Конечно-элементный анализ. Конечно-элементный анализ проводился в среде COSMOSWorks, имеющей широкий комплекс возможностей для МКЭ расчетов и хорошо зарекомендовавшей себя на рынке современных расчетных систем. Моделируя поведение объекта при заданных граничных условиях и силах, получаем распределение напряжений показанное на рисунке 4.

Результаты и выводы. Максимальное зафиксированное расчетное напряжение составляет 352,792 МПа. Предел прочности на растяжение металла, из которого изготовлен блок (40Х ГОСТ 4543-71), составляет 980 МПа, что значительно выше максимального рассчитанного напряжения. Запас прочности данного блока составляет $\approx 2,7$. Следовательно, исследуемый блок при использовании материала, указанного в конструкторской документации, соблюдении технологии изготовления и правил эксплуатации станка ИЖ250ИТВ имеет необходимую и достаточную прочность для всех вариантов нагружения и является надежным элементом рассматриваемой системы. Поломка данной детали происходила вследствие того, что в реальности был применен другой, менее прочный металл, что удалось выявить без проведения дорогостоящего металлографического анализа.

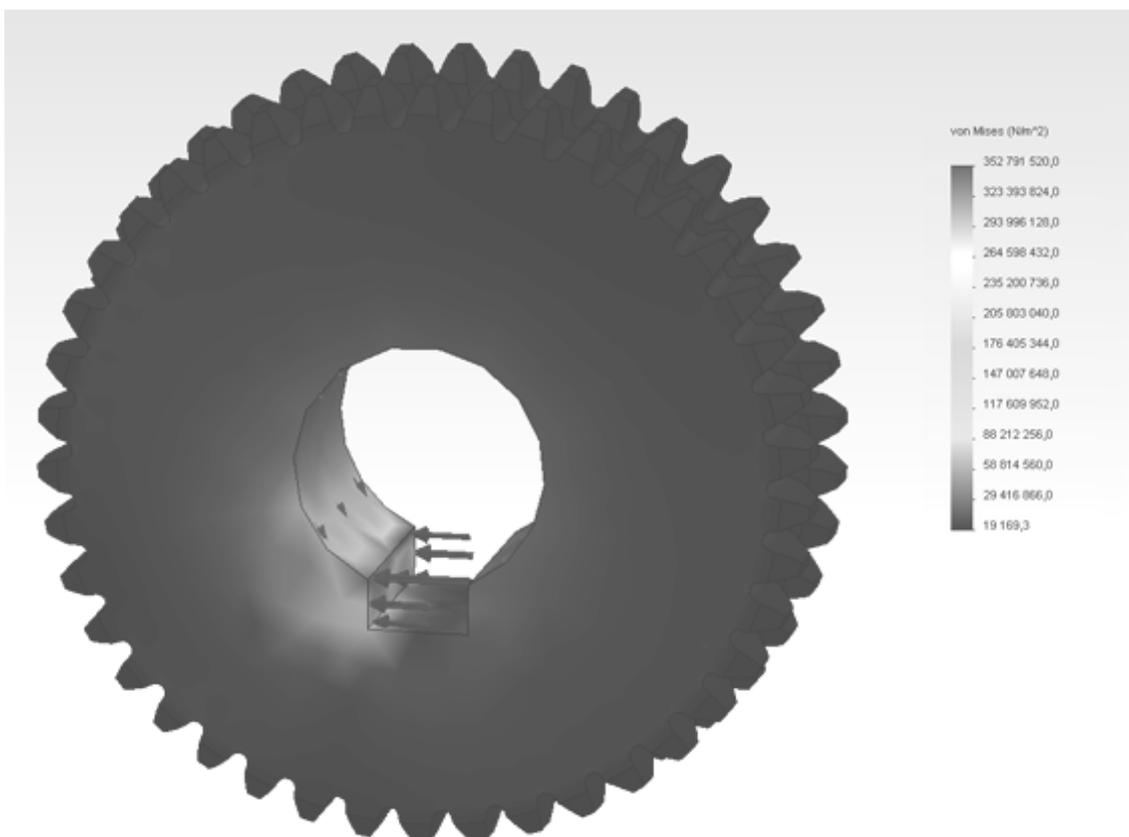


Рисунок 4 – Распределение напряжений

В качестве рекомендации по оптимизации объекта было предложено заменить шпоночное соединение шлицевым, так как при прочих равных условиях шлицевое соединение способно выдержать более высокие эксплуатационные нагрузки. При проведении конечно-элементного анализа конструкции с применением шлицевого соединения (эвольвентные шлицы 25x2x11 ГОСТ 6033-80) максимальное зафиксированное напряжение составило всего 115,2МПа, что значительно ниже напряжения, полученного при использовании шпоночного соединения. Следовательно, данный блок при замене соединения на шлицевое можно изготовить из более дешевого материала с более низким пределом прочности на растяжение, чем сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Таким образом, небольшое изменение конструкции позволило снизить себестоимость и повысить надежность изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский, А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А.А. Алямовский - М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
2. Алямовский, А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
3. Боровков, А.И. Конечно-элементная механика и компьютерный инжиниринг. Опыт применения наукоемких компьютерных технологий в образовании, научных исследованиях и промышленности // Материалы межвуз. конф. «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях». [Текст] – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2003. – С. 24–33.
4. Сызранцев, В.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния деталей методами конечных и граничных элементов [Текст] / В.Н. Сызранцев - Курган: Издательство Курганского государственного университета, 2000. – 111 с.
5. Шимкович, Д. Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / Д. Г. Шимкович – М.: ДМК Пресс, 2008. – 704 с.

Антамонов Иван Александрович

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула

Кафедра «Автоматизированные станочные системы»

Магистрант

Тел.: 8-920-278-01-41

Email: iaantamonov@gmail.com

I.A. ANTAMONOV

**THE ANALYSIS OF GEARS STRENGTH PROPERTIES
WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS**

The loads and stresses in gears have been studied. The paper considers the gears strength analysis with finite element analysis. The results of a gears analysis are given.

Keywords: *finite element analysis, strength analysis, gears, 3D model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Alyamovsky A.A., Solid Works/COSMOSWorks. Engineering Analysis by Method of Finite Elements.- M.: DMK Press, pp. 432, 2004.
2. Alyamovsky A.A., Computer Simulation in Engineering Practice, A.A. Alyamovsky, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov, A.I. Kharitonovich, N.B. Ponomaryov – S-Petersburg.: BHV-Petersburg, pp. 800, 2005.
3. Borovkov A.I. Finite-Element Mechanics and Computer Engineering. Skill of Computer High Technologies Application in Education, Scientific Researches and Industry, Proceedings of Inter-Institutional Conf. on Application Practice of Scientific Software in Education and Scientific Researches, S-Petersburg.: Publishing House of S-Petersburg STU, - 2003.
4. Syzrantsev V.N. Computation of Deflected Mode of Parts by Method of Finite and Boundary Elements V.N. Syzrantsev, K.V. Syzrantsev – Kurgan: Publishing House of Kurgan State University, pp. 111, 2000.
5. Shimkovich D.G. Femap & Nastran. Engineering Analysis by Method of Finite Elements.- M.: DMK Press, pp. 704, 2008.

Antamonov Ivan Aleksandrovich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula

Department: Automated Manufacturing Systems

Undergraduate

Phone: 8-920-278-01-41

Email: iaantamonov@gmail.com

А.П. ВЕХИНА, А.В. САМЕЙЩЕВ

РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ РАБОТЕ НА ЭКСКАВАТОРЕ

Обучение работе на сложной и дорогостоящей технике требует применения специальных тренажеров. В частности, в данной работе создан программно-аппаратный комплекс тренажера машиниста экскаватора с обратной лопатой. За базовую машину взята распространенная модель Hyundai R210LC. Предлагаемая технология, основанная на динамическом 3D моделировании работы машин и механизмов, применима к решению широкого класса задач профессионального обучения и позволяет создавать экономичные и эффективные тренажеры

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, динамическое 3D моделирование

Введение. Обучение работе на сложной и дорогостоящей технике требует применения специальных тренажеров. В частности, в данной работе создан программно-аппаратный комплекс тренажера машиниста экскаватора с обратной лопатой. За базовую машину взята распространенная модель Hyundai R210LC. Предлагаемая технология, основанная на динамическом 3D моделировании работы машин и механизмов, применима к решению широкого класса задач профессионального обучения и позволяет создавать экономичные и эффективные тренажеры (для сравнения: стоимость промышленного тренажера экскаватора составляет 800 тыс. руб., стоимость данного комплекса – менее 100 тыс).

Цель работы – повышение эффективности и снижение затрат при профессиональной подготовке машинистов экскаваторов на основе применения программно-аппаратного компьютерного тренажера, оснащенного реалистичными органами управления и средствами трехмерной визуализации.

Постановка задачи. Для решения поставленной проблемы требовалось разработать аппаратно-программный комплекс, соединяющий в себе динамическую 3D модель экскаватора, органы управления (манипуляторы типа "джойстик", аналогичные устанавливаемым на реальной машине), а также визуальную имитацию приборной доски. Тренажер выполняет следующие функции:

- динамическое отображение 3D модели экскаватора;
- эмуляция управления экскаватором при помощи внешних манипуляторов (джойстиков);
- расчет и отображение основных характеристик экскаватора в режиме реального времени;

Описание комплекса. В соответствии с техническим паспортом экскаватора Hyundai R210LC была выполнена его 3D модель нужной степени детализации и заданы требуемые углы поворота и наклона рабочих органов (ковша, рукояти, стрелы). Кроме того, выявлены максимальные линейные и угловые скорости движения рабочих органов управления.

Поскольку в программе имеется имитация информационной панели с датчиками уровня топлива, температур охлаждающей жидкости двигателя и гидравлического масла, то разработана математическая модель расчета основных рабочих параметров экскаватора. В частности, часовой расход дизельного топлива в л/ч вычисляется как ($G_{дл}$):

$$G_{дл} = \frac{N_e g_e C}{1000} \cdot \rho_{\tau} \quad (1)$$

где C – коэффициент использования мощности дизеля ($C = 0,35 - 0,45$ – ненапряженная работа машины, как правило, это работа с легкими грунтами, погрузочные работы; $C = 0,45$ –

0,60 – работы, связанные с копанием грунта и погрузкой грунтов средней категории; $C = 0,60 - 0,90$ - работы, связанные с разработкой тяжелых грунтов);

g_e - удельный эффективный расход топлива (г/кВт.час) ($g_e = 220$ г/кВт.час для данной модели);

ρ_m – плотность используемого дизельного топлива (г/см³) ($\rho_m = 0,8325$ г/см³ усредненно для летнего и зимнего ДТ).

При построении геометрической модели кинематики стрелы важнейшим моментом является расчет координат ковша в его нижней точке. С применением методов теоретической механики были выведены следующие зависимости:

$$\alpha_0 = \alpha_1 x_0 = x_0 + \Delta x \quad (2)$$

$$y_0 = y_0 + \Delta y \quad (3)$$

$$z_0 = z_0 + \Delta z \Delta z = L * (\sin(\alpha_1) - \sin(\alpha_0)) \Delta y = \sin(\alpha_t) * L * (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_0)) \quad (4)$$

$$\Delta x = \cos(\alpha_t) * L * (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_0)) \alpha_1 = \alpha_0 \pm \Delta \alpha$$

где α_0 – начальный угол наклона стрелы (рукояти, ковша);

$\pm \Delta$ – изменение угла наклона стрелы (рукояти, ковша) в зависимости от направления изменения;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – изменение координаты ковша в 3-х измерениях;

x_0, y_0, z_0 – координаты ковша в нижней точке;

α_1 - новое значение угла поворота ковша;

α_t - новое значение угла поворотной платформы.

Методика трехмерной визуализации. Для решения задачи трехмерной визуализации в тренажере применена оригинальная технология преобразования САД-модели (сборка выполнялась в КОМПАС 3D) в поверхностную модель, визуализируемую в библиотеке OpenGL. Это позволило создавать модель экскаватора стандартными средствами 3D моделирования, а затем программировать алгоритмы пространственного перемещения ее узлов. Структура созданной системы представлена на рисунке 1.

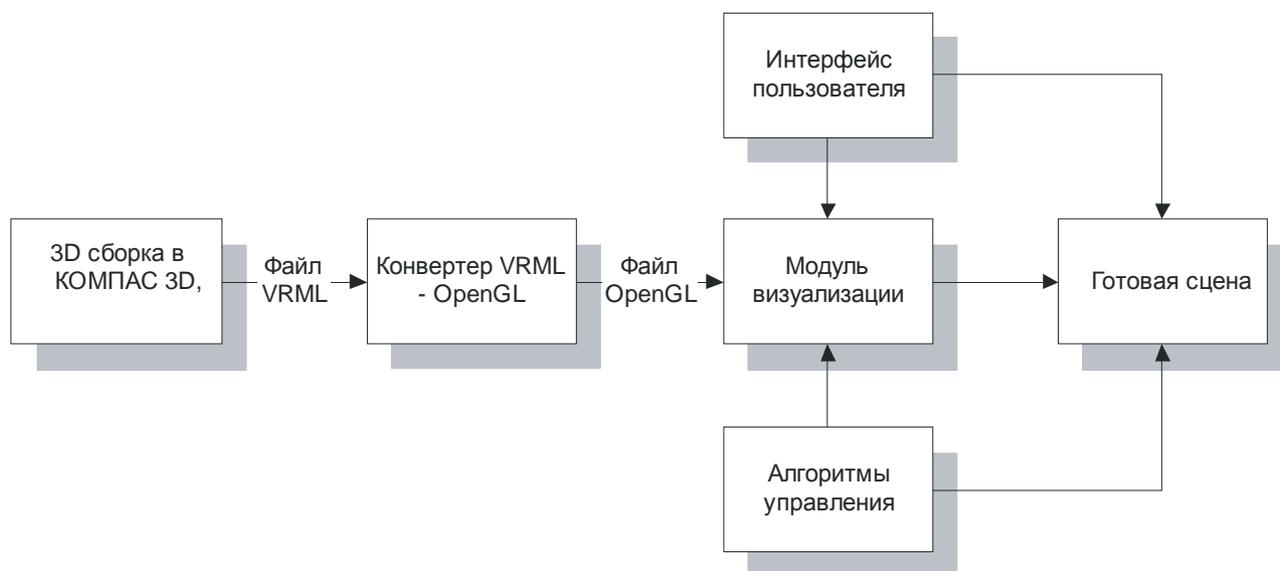


Рисунок 1 – Структура системы визуализации динамических 3D моделей

Исходная трехмерная модель создается стандартными средствами в системе КОМПАС 3D, а затем экспортируется в формат VRML. Разработанный конвертер преобразует описание поверхностей в формате VRML в описание объектов, пригодных для работы библиотеки трехмерной графики OpenGL. Модуль визуализации выводит модель на экран средствами OpenGL и обеспечивает разнообразные операции поворота, масштабирования и пр., и также управление освещением.

Выполнение заданий обучаемым. В программе предусмотрено выполнение заданий, в которых предлагается переместить определенное количество грунта из одной части плоскости в другую (рис. 2). При создании задания учитываются параметры цели, такие как высота площадки над землей, координаты, угол, необходимый для успешного сброса грунта, допустимая высота сброса груза и параметры исходного местоположения груза: высота над землей, координаты, угол, необходимый для успешного захвата. При выполнении задания также учитываются правильность и быстрота выполнения.

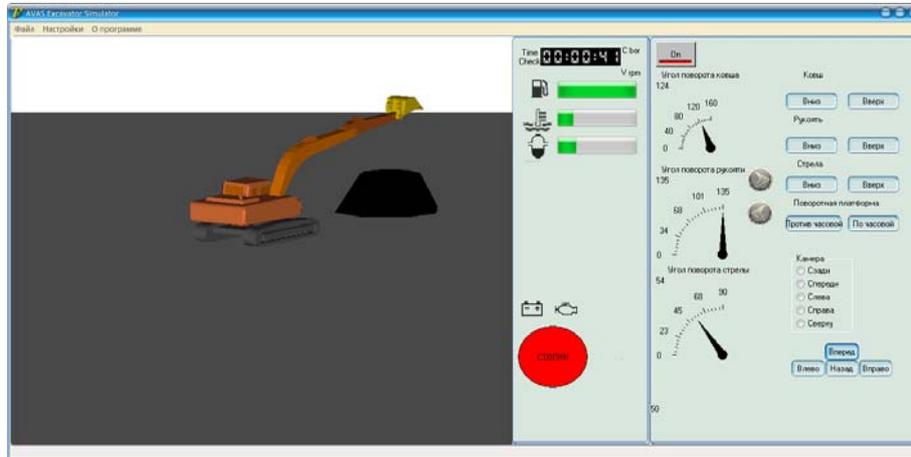


Рисунок 2 – Рабочее окно программы

Дальнейшее развитие работы.

В дальнейшем предполагается следующее развитие данного программно-аппаратного комплекса:

- параллельное отображение модели с нескольких точек обзора;
- более полное моделирование пульта управления и процедур работы машиниста;
- учет окружающей среды (например, расположения подземных коммуникаций, которые нельзя задевать);
- моделирование чрезвычайных ситуаций.
- ввод заданий на работу и автоматизированный контроль их выполнения.
- получение отчета, в котором отмечены ошибки исполнителя и время, в которое они были допущены.

Внедрение. Программно-аппаратный комплекс успешно внедрен в учебный процесс кафедр "Автоматизированные станочные системы" (разработчик) и "Подъемно-транспортные машины и оборудование" Тульского государственного университета. Ведется работа по внедрению в ряде колледжей Тульской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидравлический экскаватор Hyundai 210LC-7. Руководство по эксплуатации и обслуживанию.
2. Боресков, А. В. Графика трехмерной компьютерной игры на основе OpenGL [Текст] / А. В. Боресков. – М. : Диалог-Мифи, 2004. – 384 с. : ил.
3. Верма, Р. Д. Введение в OpenGL [Текст] / Р. Д. Верма. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 303 с. : ил.
4. Фленов, М. Е. DirectX и Delphi. Искусство программирования [Текст] / М. Е. Фленов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 384 с. : ил. + 1 опт.диск (CD ROM).
5. Жарков, Н. В. КОМПАС-3D v11 [Текст] / Н. В. Жарков, М. А. Минеев, Р. Г. Прокди. – СПб. : Наука и Техника, 2010. – 685 с. : ил.

Вехина Анна Павловна

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Студент кафедры «Автоматизированные станочные системы»
Тел: 8-953-428-63-85
E-mail: anya.vehina@yandex.ru

Самейщев Антон Владимирович

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Студент кафедры «Автоматизированные станочные системы»
Тел: 8-953-420-55-62
E-mail: samanthony@mail.ru

A.P. VEKHINA, A.V. SAMEYSHCHEV

AN EXCAVATOR SIMULATOR DEVELOPMENT

Dedicated simulators are used for mastering complicated and expensive machinery operations. This paper deals with a software simulator of a back shovel excavator. The basic model is the widely used Hyundai R210LC. The proposed technology based on 3D dynamic modeling of mechanisms can be applied to various aspects of professional training and enables making cost efficient simulators

Keywords: software simulator, dynamic 3D modeling.

BIBLIOGRAPHY

1. Hydraulic Excavator Hyundai 210LC-7. Operating Manual and Maintenance.
2. A.V. Boreskov, Graphics of 3D Computer Game based on OpenGL / A.V. Boresko.- M.: Dialogue-MIPI, pp. 384, 2004.: - ISBN 5-86404-190-4: 78.75.
3. R.D. Verma, Introduction in OpenGL / R.D. Verma.- M.: Hot Line-Telecom., 2004.-pp.303: ill.-ISBN 5-93517-177-5: 151.00.
4. M.E. Flyonov, DirectX and Delphi, Programming / M.E. Flyonov.-S-Petersburg: BHV-Petersburg, pp. 384, 2006: ill.+1opt. disk (CD ROM).
5. N.V. Zharkov, COMPAS-3D v11 // N.V. Zharkov, M.A. Mineyev, Prokdy.-S-Petersburg: Science & Engineering, pp. 685, 2010: ill.

Vekhina Anna Pavlovna

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Student
Phone: 8-953-428-63-85
E-mail: anya.vehina@yandex.ru

Sameyshchev Anton Vladimirovich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Student
Phone: 8-953-420-55-62
E-mail: samanthony@mail.ru

О.А. ЕРЗИН, Е.С. ГОСПОДЫНЬКО

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье представлена энергетическая модель технологической системы, являющаяся основой методики оценки эффективности технологических операций, позволяющей определять требуемое количество материальных и энергетических ресурсов, сравнить приведенные их значения для различных условий функционирования и наметить пути снижения их потерь.

Ключевые слова: энергетическая модель; технологическая система; оценка потерь

Известные методы оценки эффективности технологических операций, как правило, носят организационно-экономический характер, что влечет за собой чрезмерные обобщения и уход от их физической сущности, происходящих явлений. Они не позволяют вскрыть технические аспекты той или иной проблемы и наметить пути её решения [1, 2, 3].

В модели гибкого автоматизированного участка [4] сделана попытка учесть все особенности технологических процессов, материальных потоков и специфики производства в натуральных категориях. Полученное описание системы отличается громоздкостью, трудно подвергается анализу и не дает возможности сформировать единый подход к различным иерархическим уровням технологической системы ТС. Известны методы моделирования, рассматривающие материальные и энергетические потоки через их расходы и наборы физико-химических и качественных показателей [10]. В результате возрастает размерность моделей до 500...1500 переменных, каждая из которых может иметь свой критерий оценки. Хотя и отмечается, что наибольший удельный вес приходится на параметры и связи производственной структуры и технической системы, но не предусматривается возможность их вариации в процессе изменения условий функционирования и управления. Это ограничивает область возможных оптимальных стратегий. Модель многопродуктового производства [3] построена в классе непрерывных функций и в экономических категориях стоимость, доход, спрос, предложение и т. д. Она позволяет сформировать оптимальные стратегии управления ТС при регулировании цены и объемов производства. Однако не вскрывает внутренних резервов системы, не дает возможности определить основные источники потерь и наметить структурные и параметрические изменения в системе, приводящие к адаптации ее к вариациям внешних условий.

Очевидно, для анализа функционирования ТС целесообразно представить её в виде взаимосвязанной многоконтурной системы, имеющей определённую иерархию [8]. Входами системы являются потоки основных и вспомогательных материалов, комплектующих и полуфабрикатов, потоки различных видов энергии. Выходы - это материальный поток готовой продукции, материальные отходы и потери энергии. Каждый поток имеет соответствующую интенсивность и качество. Под качеством будем понимать номенклатуру его составляющих и их параметры. ТС характеризуется некоторой структурой и параметрами. Структуру определяет совокупность взаимосвязанных контуров управления преобразованием потоков основных и вспомогательных материалов, инструмента, энергии и т. д. В качестве параметров такой системы выступают характеристики используемых технических средств и технологических процессов. Влияние элементов и контуров друг на друга задаётся функциями или операторами взаимных связей. Современные условия заставляют рассматривать ТС на различных иерархических уровнях как динамический объект. В течение длительных периодов времени она может функционировать в переходных режимах, сопровождаемых, например, колебаниями программы выпуска продукции.

Для решения поставленной задачи и обеспечения единого подхода к различным по физической сущности, динамике, а в некоторых случаях и целям управления, контурам целесообразно использовать энергетические категории. Они позволяют сохранить

своеобразие и технические особенности всех уровней системы: воздействие, процесс, машина, система машин [9]. Кроме этого они позволяют перейти от системы с неформализованными и слабыми связями между контурами к стройному единому описанию ТС операции, а в дальнейшем, например при решении задач анализа динамики, к представлению ее в виде одноконтурной системы.

Воспользуемся предложенным ранее методом представления состояния ТС в некотором энергетическом пространстве [9]. В этом случае предметы производства, заготовки, детали и др. (материальный поток) должны быть представлены соответствующими энергетическими категориями - энергетическим содержанием элементов материального потока. Важно обеспечить идентичность подхода в определении энергетического содержания любого элемента на любой стадии технологического процесса.

Энергетическая модель, например, основного контура ТС операции без учета перекрестных связей может быть представлена в виде системы, входом в которую является энергия заготовки $\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$, а выходом - энергия детали $\dot{A}_{\dot{\alpha}}$,

$$\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \dot{A}_{\dot{\alpha}} + \dot{A}_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что пренебрежение перекрестных связей делает невозможным определение $\dot{A}_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}}$ на основании чисто кинематических и геометрических характеристик выполняемой операции и детали соответственно. В этом случае структурная схема ТС операции может быть представлена следующим образом (см. рис. 1).

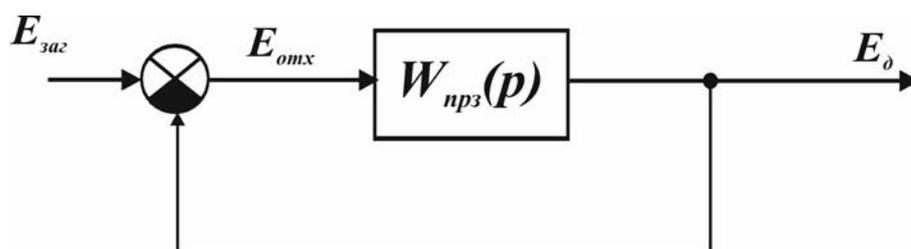


Рисунок 1 – Структурная схема основного контура энергетической модели технологической системы операции

В этом случае в прямой цепи

$$W_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}} = \frac{\dot{A}_{\dot{\alpha}}}{\dot{A}_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}}} = \frac{1}{(\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\alpha}} / \dot{A}_{\dot{\alpha}}) - 1}, \quad (2)$$

где $\dot{A}_{\dot{\alpha}} / \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \hat{O}_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}}(\dot{\delta})$ - передаточная функция замкнутой системы преобразования заготовки в деталь.

Передаточная функция $\hat{O}_{\dot{\gamma}\dot{\delta}\dot{\delta}}(\dot{\delta})$ отражает динамику изменения снимаемого с заготовки припуска, а в установившемся режиме коэффициент использования материала на конкретной операции.

К числу статических характеристик основного контура следует отнести коэффициент использования материала, который определяет его добротность. Инерционность контура зависит от длительности технологических операций и времени ожидания поступления следующей детали. При наличии в технологической цепочке межоперационных заделов формально длительность обработки конкретной детали возрастает на время ее пролеживания в заделах. С точки зрения управления заделы должны рассматриваться как элементарные звенья с запаздыванием. Величина запаздывания пропорциональна их ёмкости и длительности технологической операции.

Добротность энергетического контура можно определить как отношение энергии диссипируемой в ТС к вводимой в неё. Она характеризует качество используемого оборудования, реализуемых технологических процессов и режимов работы. При такой постановке важное значение приобретает понятие полезной энергии. Под ней будем понимать энергию, идущую на преобразование свойств и формы заготовок, а также

изменение пространственного расположения элементов материальных потоков. Таким образом, полезной является вся вводимая в ТС энергия, за исключением энергии, выделяемой в виде тепла [9]. Инерционностью большинства элементов этого контура можно пренебречь по сравнению с основным контуром.

Добротность контура инструмента характеризует эффективность его использования. Если предположить, что каждый инструмент, прежде чем попасть в отходы, произвёл некую заданную полезную работу, то можно принять добротность этого контура равной единице. В этом случае такие характеристики, как число перезаточек, отношение числа инструментов, находящихся в работе, к общему числу инструментов в ТС и т. д. являются внутренними параметрами контура. Его инерционность можно определить через время необходимое для доставки требуемого типа инструмента в начало заданного рабочего участка траектории его движения применительно к конкретному оборудованию [9].

В этом случае такие известные характеристики, как количество инструмента и энергии, необходимых для производства единицы продукции, выступают в виде коэффициентов перекрёстных связей.

На основании описания ТС в энергетическом пространстве [9] её декомпозиция на элементарные объекты становится достаточно очевидной. Это даёт возможность выделить главные и второстепенные входы и выходы и применить известное условное деление [8].

Энергетическая модель основного контура ТС операции с учетом перекрестных связей должна быть представлена в виде системы, входом в которую является полная вводимая энергия $E_{i\dot{i}\ddot{e}}$, а выходом - энергия детали $E_{\ddot{a}}$

$$E_{i\dot{i}\ddot{e}} = \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{Y} + \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{I} \quad (3)$$

$$E_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{I} = \dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{a}} + \dot{A}_{\dot{e}\zeta\dot{\alpha}} \quad (4)$$

где $\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{a}}$ – энергия заготовки; $\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{Y}$ – все виды энергии, затрачиваемой системой на преобразование заготовки в деталь в конкретных регламентированных условиях производства [9];

$\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{I}$ – энергия всех видов материальных ресурсов используемых при выполнении операции.

При таком подходе энергетическая модель (ЭМ) технологической операции (ТО) может быть представлена следующей структурной схемой (рис. 2).

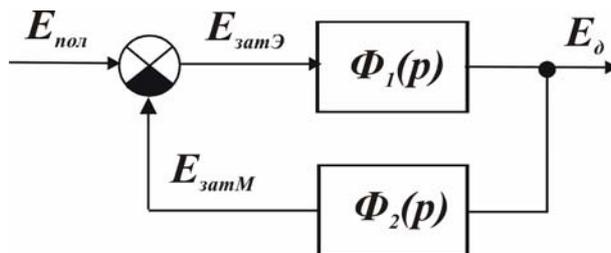


Рисунок 2 – Структурная схема энергетической модели технологической системы операции

Из схемы видно, что $\hat{O}_1(\delta) = \frac{\dot{A}_{\ddot{a}}}{\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{Y}}$ - передаточная функция преобразования энергетических ресурсов в энергию заготовки, обратная ей функция отражает динамику изменения приведенных затраты энергии; $\hat{O}_2(\delta) = \frac{\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{\delta}} \dot{I}}{\dot{A}_{\ddot{a}}}$ - обратная передаточная функция преобразования энергии входных материальных ресурсов в энергию детали.

Очевидно, модель ТС операции должна быть преобразована таким образом, чтобы обеспечить сочленение моделей различных операций в общем ТП. Вероятно, объединение должно производиться в соответствии с принципами преобразования основного материального потока: т.е. входом должны быть $\dot{A}_{\zeta\dot{\alpha}\ddot{a}}$, а выходом $\dot{A}_{\ddot{a}}$. Очевидно, модель ТС

операции должна быть преобразована таким образом, чтобы обеспечить сочленение моделей различных операций в общем ТП. Вероятно, объединение должно производиться в соответствии с принципами преобразования основного материального потока: т.е. входом должны быть $\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}}$, а выходом $\dot{A}_{\bar{a}}$ (рис. 3).

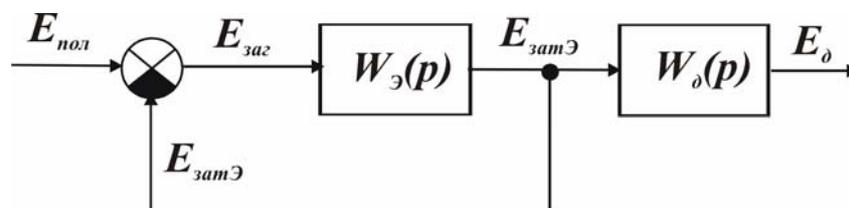


Рисунок 3 – Преобразованная структурная схема энергетической модели технологической системы операции

Для упрощения дальнейших выкладок пренебрежем затратами, связанными с износом инструмента. Они не соизмеримо меньше затрат энергии на формирование отходов основного материала. Тогда на основании закона сохранения энергии можно записать

$$E_{i\delta\bar{e}} = \dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} \dot{Y} + \dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} = \dot{A}_{\bar{a}} + \dot{A}_{i\delta\bar{o}} + \dot{A}_{i\delta\bar{y}}, \quad (5)$$

или

$$\frac{\dot{A}_{i\delta\bar{e}}}{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}}} = 1 + \frac{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{o}} \dot{Y}}{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}}} = 1 + \frac{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{o}} \dot{Y}}{\dot{A}_{\bar{a}}} \frac{\dot{A}_{\bar{a}}}{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}}} = 1 + \hat{O}_1^{-1}(\delta) \cdot \hat{O}_2^{-1}(\delta). \quad (6)$$

В тоже время в соответствии с законом сохранения энергии, используя равенство (5) можно записать

$$\dot{A}_{\bar{a}} + \dot{A}_{i\delta\bar{o}} = \dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} + \dot{A}_{\zeta\delta\bar{o}} \dot{Y} - \dot{A}_{i\delta\bar{y}} = \dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}} + \dot{A}_{i\delta\bar{o}}, \quad (7)$$

где $\dot{A}_{i\delta\bar{o}}$ - энергия, которую необходимо затратить, чтобы диспергировать заготовку на деталь и отходы, характеризуемые, также как и деталь, определенной геометрией и массой (F, m).

Это равенство позволяет сохранить адекватность модели при $\frac{\dot{A}_{\bar{a}}}{\dot{A}_{\zeta\delta\bar{a}}} \leq 1$.

Очевидно, энергию преобразования условно можно представить в виде двух составляющих:

$$\dot{A}_{i\delta\bar{o}} = \dot{A}_{i\delta\bar{o}} + \dot{A}_{i\delta\bar{c}}, \quad (8)$$

где $\dot{A}_{i\delta\bar{c}}$ - полезная составляющая энергии преобразования, характеризующая затраты энергии на формирования поверхностей детали. Она является функцией параметров оборудования и технологического процесса.

Вычисление $\dot{A}_{i\delta\bar{y}}$ - представляет собой определённую проблему, так как предполагается учет режимов обработки.

$$\dot{A}_{i\delta\bar{y}} = \Delta \dot{A}_{\delta\delta\bar{c}} + \Delta \dot{A}_{\bar{n}\delta\bar{o}} + \Delta \dot{A}_{\delta\bar{a}\bar{o}\bar{i}} + \Delta \dot{A}_{\bar{e}\bar{i}}, \quad (9)$$

где $\Delta \dot{A}_{\delta\delta\bar{c}}$ - потери на нагрев и деформацию обрабатываемого материала;

$\Delta \dot{A}_{\bar{n}\delta\bar{o}}$ - потери на образование поверхностей стружки;

$\Delta \dot{A}_{\delta\bar{a}\bar{o}\bar{i}}$ - потери на образование лишних поверхностей обусловленных необходимостью многопроходной обработки;

$\Delta \dot{A}_{\bar{e}\bar{i}}$ - потери в приводах технологической системы.

В этом случае структурная схема энергетической модели ТС операции можно представить следующим образом

Из нее можно видеть, что

$$W_{\dot{Y}}(\delta) = \hat{O}_1^{-1}(\delta) \cdot \hat{O}_2^{-1}(\delta); \quad (10)$$

$$W_{\dot{Y}}(\delta) = \hat{O}_1(\delta),$$

где $W_Y(p)$ - передаточная функция, определяющая необходимые энергетические ресурсы ($\dot{A}_{\zeta\grave{a}\grave{o}} \dot{Y}$) для производства деталей с энергией $\dot{A}_{\grave{a}}$ из заготовок с энергией $\dot{A}_{\zeta\grave{a}\grave{a}}$;

$W_{\grave{a}}(p)$ - передаточная функция, определяющая эффективность использования энергии в ТС операции.

Очевидно в реальных условиях, всегда существует расхождение Δ между требуемым значением энергии детали $\dot{A}_{\grave{a}0}$ и получаемым $\dot{A}_{\grave{a}}$ в количественном и качественном выражении. Задача системы управления ТС операции заключается в минимизации этих отклонений. Передаточная функция регулятора системы $W_P(p)$ определяет материальные и энергетические ресурсы, необходимые для получения деталей с заданным значением $\dot{A}_{\grave{a}0}$. Структурная схема энергетической модели ТС операции примет в этом случае вид, представленный на рисунке 4. Можно предположить, что эта система статическая, то есть функционирует всегда с некоторой ошибкой Δ . В определенном смысле Δ это ошибка в свойствах получаемых деталей.

Очевидно, предложенный подход можно распространить модель функционирования ТС при выполнении некоторой годовой программы (N).

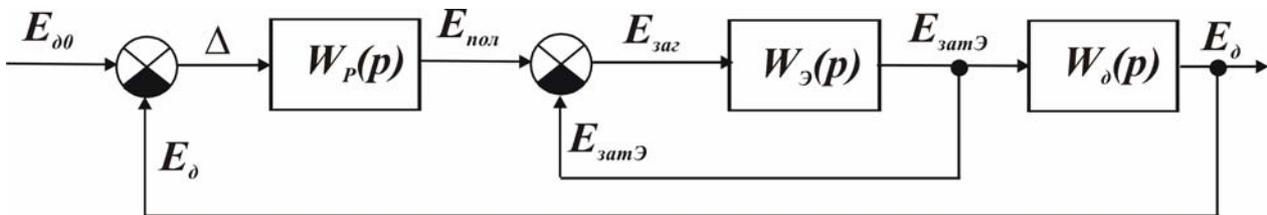


Рисунок 4 – Структурная схема энергетической модели технологической системы операции со звеном регулятора

В этом случае учет программы выпуска равносильно пропорциональному увеличению энергии детали $\dot{A}_{\grave{a}0}$, то есть $\dot{A}_{\grave{a}0n} = N\dot{A}_{\grave{a}0}$ представляет собой спрос на конкретные детали-операции. Тогда Δ -дефицит получаемых деталей в количественном и качественном выражении. На рисунке 5 представлена структурная схема модели ТС операции, функционирующей в условиях заданной программы выпуска деталей.

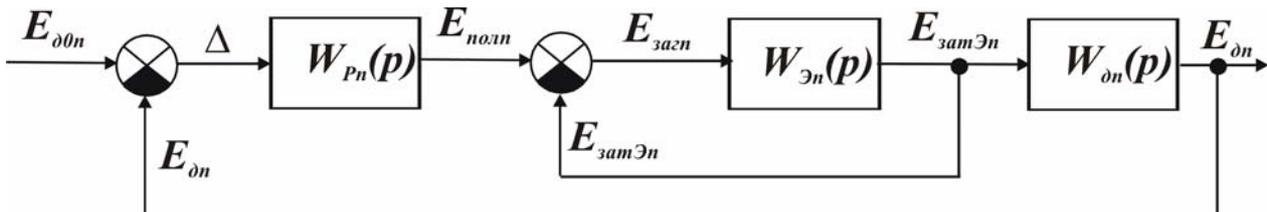


Рисунок 5 – Структурная схема энергетической модели технологической системы операции при заданной программе выпуска деталей

Интересно отметить, что в общем случае $\dot{A}_{\grave{a}n} \neq N\dot{A}_{\grave{a}}$; $\dot{A}_{\grave{a}\grave{a}n} \neq N\dot{A}_{\grave{a}\grave{a}}$; $\dot{A}_{\zeta\grave{a}\grave{a}n} \neq N\dot{A}_{\zeta\grave{a}\grave{a}}$ и т. д. Это объясняется тем, что параметры соответствующих передаточных функций зависят от программы выпуска деталей.

Очевидно, $\dot{A}_{\grave{a}\grave{a}n} > 0$ всегда, она определяет необходимое количество ресурсов для получения заданного количества деталей, заданного качества. Если предположить неограниченность материальных и энергетических ресурсов ТС, то можно считать регулятор $W_P(p)$ - безынерционным звеном, то есть $W_P(p) = \hat{E}_D$. Он определяет стратегию производства в смысле удовлетворения спроса и возможности ТС по покрытию этого спроса (вероятно здесь следует говорить о части спроса которую потенциально может удовлетворить конкретная ТС).

Предложенная энергетическая модель позволяет оценить эффективность ТС не только в комплексе, то есть по готовой продукции конкретного вида, но и по конкретной детали входящей в готовую продукцию, так как спрос на конкретную деталь определяется спросом на готовое изделие.

Вероятно, Δ в энергетической модели однозначно определяется экономико-социальным запросом, так как в основу любой ТС положена цель удовлетворения потребностей, уменьшения или даже «ликвидации» дефицита.

Структурная схема энергетической модели технологической системы операции, приведенная на рисунке 5. может быть легко преобразована в модель, характеризующую динамику изменения энергетических потоков, поскольку

$$\dot{A}_{\dot{a}} = \int_0^{t_{\phi \dot{\delta}}} \dot{D}_{\dot{a}} dt, \quad (11)$$

где $\dot{D}_{\dot{a}}$ - поток энергии элемента материального потока (детали), формирующий за штучное время $t_{\phi \dot{\delta}}$ заданное энергетическое содержание детали $\dot{A}_{\dot{a}}$.

Разработанная энергетическая модель ТС операции является основой методики оценки эффективности технологических операций, позволяющей определять требуемое количество материальных и энергетических ресурсов, сравнить приведенные их значения для различных условий функционирования и наметить пути снижения их потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация дискретного производства [Текст] / Под общ. ред. проф. Е. И. Семенова и проф. Л. И. Волчкевича. – М. : Машиностроение; – София : Техника, 1987. – 520 с.
2. Имитационное моделирование в оперативном управлении производством [Текст] / Н. А. Саломатин, Г. В. Беляев, В. Ф. Петроченко [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 208 с.
3. Левшин, Л.В. Экономические связи между производством и потреблением [Текст]. - «Экономика», 1972.
4. Основы автоматизации управления производством [Текст] / Под ред. чл.-кор. АН СССР И. М. Макарова. – М. : Высш. школа, 1983. – 504 с.
5. Основы управления технологическими процессами [Текст] / Под ред. Н. С. Райбмана. – М. : Наука, 1978. – 440 с.
6. Петров, В. А. Планирование гибких производственных систем [Текст] / В. А. Петров, А. Н. Масленников, Л. А. Осипов. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 182 с.
7. Пуховский, Е. С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства [Текст] / Е. С. Пуховский. – Киев : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 240 с.
8. Растрингин, Л. А. Современные принципы управления сложными объектами [Текст] / Л. А. Растрингин. – М. : Сов. Радио, 1980. – 232 с.
9. Сальников, В. С. Технологические основы эффективного энергопотребления производственных систем [Текст] / В. С. Сальников. – Тула : Изд-во «Тульский полиграфист», 2003. – 187 с.
10. Справочник проектировщика АСУ ТП [Текст] / Под ред. Г. Л. Смилянского. – М. : Машиностроение, 1983. – 527 с.

Ерзин Олег Александрович

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула

Канд.техн.наук, зам. декана «Факультет вечернего и заочного обучения», доц. каф. «Автоматизированные станочные системы»

Тел: (4872) 35-18-50

E-mail: erzin79@mail.ru.

Господынько Екатерина Сергеевна

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула

Магистрант кафедры «Автоматизированные станочные системы»

Тел: 8-920-742-00-99

E-mail: medvedov.net@mail.ru

O.A. ERZIN, E.S. GOSPODINKO

THE ENERGY MODEL OF A MANUFACTURING SYSTEM

The paper presents an energy model of a manufacturing system which is a foundation for manufacturing efficiency evaluation in order to determine the required amount of material and energy resources, compare the values for various modes, and find the ways to decrease the losses.

Keywords: *energy model; manufacturing system; loss evaluation*

BIBLIOGRAPHY

1. Discrete Production Automation / Under the general editorship of Prof. E.I. Semyonov and Prof. L.I. Volchkevich.-M.: Mechanical Engineering; - Sophia: Technique, pp. 520, 1987.
2. Imitating simulation in Production Day-To-Day Management / N.A. Salomatin, G.V. Belyaev, V.F. Petrochenko, E.V. Proshlyakov.-M.: Mechanical Engineering, pp. 208, 1984.
3. L.V. Levshin, Economic Ties between Production and Consumption. "Economy", 1972.
4. Fundamentals of Production Control Automation / Under the Editorship of I.M. Makarov, Corresponding Member of Academy of Sciences of the USSR.-M.: Higher School, pp. 504, 1983
5. Fundamentals of Engineering Procedure Control, Under the Editorship of N.S. Raibman.-M.: Science, pp. 440, 1978.
6. V.A. Petrov, A.N. Maslennikov, L.A. Osipov, Flexible Manufacturing Systems Planning, - L.: Mechanical Engineering, Leningrad. Section, pp. 182, 1985.
7. E.S. Pukhovskiy, Engineering Fundamentals of Flexible Automated Manufacturing.- Kiev: Higher School, Lead Publishing House, pp. 240, 1989.
8. L.A. Rastrigin, Modern Principles of Complex Objects Management. – M.: Sov. Radio, pp. 232, 1980.
9. V.S. Salnikov, Technological Fundamentals of Effective Power Consumption in Production Systems.- Tula: Publishing House "Tula Polygraphic Worker", pp. 187, 2003.
10. Designer's Reference Book of Automatic Control System TP / Under the Editorship of G.L. Smilyansky.- M.: Mechanical Engineering, pp. 527, 1983.

Erzin Oleg Aleksandrovich

Can.Sc.tech., Assistant Professor of dept. Automated Manufacturing Systems

Phone: (4872) 35-18-50

Email: erzin79@mail.ru.

Gospodinko Ekaterina Sergeevna

FSBEI HVT «Tula State University», Tula

Undergraduate of dept. Department: Automated Manufacturing Systems

Phone: (4872) 37-31-53

Email: iaantamonov@gmail.com

В.В. ЖМУРИН, В.С. САЛЬНИКОВ

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА БАЛАНСИРОВКИ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы, связанные с балансировкой шпиндельного узла (ШУ). Приводятся результаты аналитических исследований о влиянии сил резания на условия балансировки ШУ. На их основании предложена математическая модель динамики неуравновешенного шпиндельного узла, учитывающая силы резания.

Ключевые слова: *качество балансировки, дисбаланс, гидростатические опоры, магнитные опоры, опоры качения, шпиндельный узел, шероховатость поверхности, точность обработки, радиальный зазор, осевой зазор, кинетическая энергия, ротор, эксцентриситет, главные моменты инерции ротора, экваториальный момент инерции, полярный момент инерции ротора, статическая неуравновешенность.*

Технология высокоскоростной обработки требует высокой частоты вращения, высокой точности, жесткости и виброустойчивости.

Для выполнения перечисленных требований в современных станках, предназначенных для ВСО, в их шпиндельных узлах применяются воздушные, гидростатические и магнитные опоры. Они по точности и быстроходности превосходят опоры качения и скольжения [1].

Вид опор, материал и качество их изготовления существенно влияют на точность детали и качество получаемой поверхности. Исследования, проведенные фирмой «Станко-Пром» показывают, что отклонение от круглости обработанного изделия, установленного в шпинделе на гидростатических опорах, составляет 0,2 мкм, в то время как при установке изделия в шпиндель на опорах качения этот параметр равен 1 мкм. Шпиндельный узел с магнитными опорами обеспечивает шероховатость обработанной поверхности 0,025 мкм, с опорами качения 0,32 мкм, а с гидродинамическими опорами скольжения 0,16.

На большинстве металлообрабатывающих предприятий широко применяются многоцелевые станки с диапазоном частот вращения до 15000-20000 об/мин. Они обеспечивают высокую точность обработки и качество получаемой поверхности. Поэтому для МЦС актуальны требования к высокой точности, жесткости и виброустойчивости ШУ [1].

Многоцелевые фрезерные станки позволяют выполнять операции фрезерования, сверления, растачивания и нарезание резьбы. В силу этого они отличаются большим разнообразием назначаемых режимов резания. Это накладывает на их конструкцию особенности, главные из них - обеспечение плавности вращения шпинделя и виброустойчивость [1].

Для борьбы с вибрациями применяется балансировка шпиндельного узла в сборе. В процессе эксплуатации происходит износ деталей ШУ, это приводит к вибрациям. На практике постоянный контроль качества балансировки дорогостоящий и трудоёмкий процесс. Поэтому для определения зоны резонансных частот целесообразно использовать математическую модель движения шпинделя.

Динамика шпиндельного узла, в значительной степени зависит от его длины, качества балансировки и характеристик подшипников, в частности от их осевой и радиальной жесткости. В прошлом подшипник качения, рассматривался, как модель абсолютно жесткой опоры. Этого было достаточно, так как скорости резания не превышали 50-60 м/мин, а число оборотов шпинделя не превышало 5000 об/мин. В настоящее время обработка ведется на скоростях резания 200-1000 м/мин при частотах вращения шпинделя 15000-20000 об/мин. Поэтому рассмотрение подшипников качения как абсолютно жестких опор является некорректно [2,4].

В многочисленных работах, опубликованных за последние годы, в качестве математической модели подшипника качения выбираются такие модели, которые учитывают: погрешности геометрии, влияние зазоров, а также их изменение в процессе эксплуатации, нелинейные жесткостные свойства, влияние центробежных сил тел качения, взаимное смещение и перекося колец подшипников, гироскопические явления [2].

Согласно ГОСТу 22061-76 и стандарту ИСО 1940-1-2007 все тела, которые при вращении удерживаются своими несущими поверхностями в опорах, называются роторами. Таким образом, шпиндельный узел станка с математической точки зрения можно упрощенно представить как ротор.

Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает модель движения ротора, изложенная в работах А.С. Кельзона. В ней принят ряд допущений.

Одна опора представлена в виде жесткого шарнира, допускающего только угловые перемещения. Вторая опора представлена в виде радиально-упорного шарикоподшипника с системой, обеспечивающий осевой предварительный натяг. При выводе уравнения движения ротора периодические изменения жесткости подшипника, вызываемые прохождением шариков относительно вектора радиальной нагрузки на подшипник учитываться не будут. Мощность источника вращения считается неограниченной. При выводе уравнений движения ротора учитывается только статическая неуравновешенность ротора, которая предполагает, что главная центральная ось инерции ротора параллельна его геометрической оси. Центр тяжести ротора смещен от геометрической оси на величину эксцентриситета e мкм. Положение ротора в подшипнике показано на рисунке 1 [2,4].

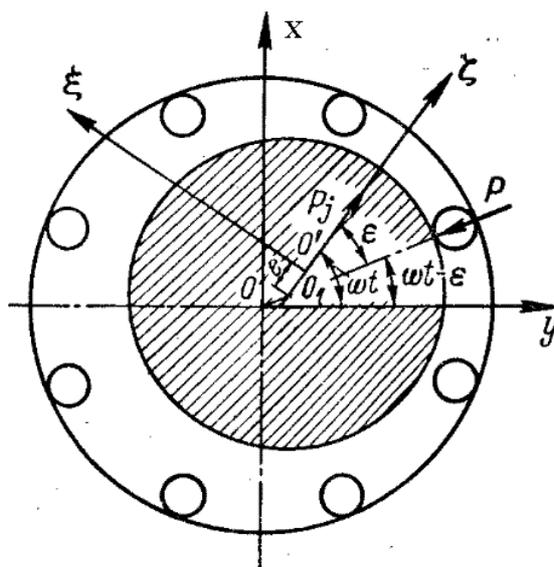


Рисунок 1 – Положение ротора в шарикоподшипнике.

На рисунке 1 обозначены: O -геометрический центр опор,

O_1 -положение геометрической оси ротора,

O' -положение центра масс ротора с приложенной к нему силой инерции $P_j = M \cdot e \cdot \omega^2$,

где M -масса ротора,

ω -угловая скорость ротора.

В качестве неподвижных осей координат были выбраны оси xuz с началом в точке O и подвижные оси $\xi\zeta\eta$ с началом в точке O' . Тогда уравнение кинетической энергии ротора, вращающегося вокруг неподвижной точки, имеет вид [2,3]:

$$T = \frac{1}{2} (J_{\xi} \omega_{\xi}^2 + J_{\zeta} \omega_{\zeta}^2 + J_{\eta} \omega_{\eta}^2) \quad (1)$$

где $J_{\xi}; J_{\zeta}; J_{\eta}$ - главные моменты инерции ротора,

$\omega_{\xi}^2; \omega_{\zeta}^2; \omega_{\eta}^2$ - проекция вектора угловой скорости на подвижные оси координат [2,3].

Примем следующие обозначения

$$J_{\xi} = J_{\zeta} = B,$$

где B - экваториальный момент инерции;

$J_{\eta} = A$ - полярный момент инерции ротора вместе с подвижными частями подшипника.

Вычислив эти значения до первого порядка, получаем [2]:

$$\omega_{\xi} = \dot{\beta} \cos \gamma = \dot{\beta}; \omega_{\zeta} = -\dot{\gamma}; \omega_{\eta} = \omega + \dot{\beta} \sin \gamma \quad (2)$$

В формуле (2) β и γ - углы между геометрической осью ротора и плоскостями xOz и xOy . Считая β и γ малыми, можно представить:

$$\beta = y/l \text{ и } \gamma = z/l,$$

где l - расстояние между опорами.

Учитывая формулу (2) окончательно уравнение кинетической энергии ротора примет вид [2]:

$$T = \frac{1}{2} \left[B(z^{\cdot 2} + y^{\cdot 2}) + (\omega^2 l^2 + 2\omega z \dot{y}) \right] \frac{1}{l^2} \quad (3)$$

Будем считать, что сила сопротивления, пропорциональна первой степени скорости колебательного движения. Тогда диссипативную функцию можно представить как:

$$W = \frac{1}{2} n(z^{\cdot 2} + y^{\cdot 2}) \quad (4)$$

При принятых допущениях радиальное упругое поле подшипника можно считать изотропным. Тогда проекции нелинейной восстанавливающей силы $P(r)$ на оси координат можно записать, как $P(z)$ и $P(y)$. В результате для обобщенных сил имеем систему уравнений описывающих движение ротора [2].

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= P(z) + \frac{1}{2} M e \omega^2 \sin \alpha t \\ Q_y &= P(y) + \frac{1}{2} M e \omega^2 \cos \alpha t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Предложенная модель может быть применима к шпинделю станка только в том случае если он работает на холостых оборотах. При обработки на ШУ помимо нелинейной восстанавливающей силы $P(r)$ действуют ещё и силы резания.

При фрезеровании основную работу резания производит окружная сила P_z , которая действует касательно к траектории движения точки A режущей кромки инструмента (рис. 2). Радиальная сила P_y направлена по радиусу к центру фрезы. Она изгибает оправку, в которой крепится фреза, и давит на подшипники передней опоры шпинделя станка, а это в свою очередь оказывает влияние на качество балансировки. Равнодействующая сил резания R расположена, перпендикулярна к оси фрезы. Она определяется по формуле $R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}$, где $P_y = (0.6 \div 0.8) P_z$. Окружная сила резания определяется по формуле (6) [5].

$$P_z = \frac{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^{XPZ} \cdot S_Z^{YpZ} \cdot B^{Wp} \cdot Z}{D^{QpZ} \cdot n^{Wp}}; \quad (6)$$

где P - окружная сила резания, кгс;

C_{PZ} ; - коэффициент соответствующий силе P при значениях всех факторов, равных единице;

t - глубина фрезерования, мм;
 S_z - подача на зуб фрезы, мм;
 B - ширина фрезерования, мм;
 Z - число зубьев фрезы;
 D - диаметр фрезы, мм;
 $x_{PZ}; y_{PZ}; q_{PZ}; u_P; w_P$ - показатели степеней [5].

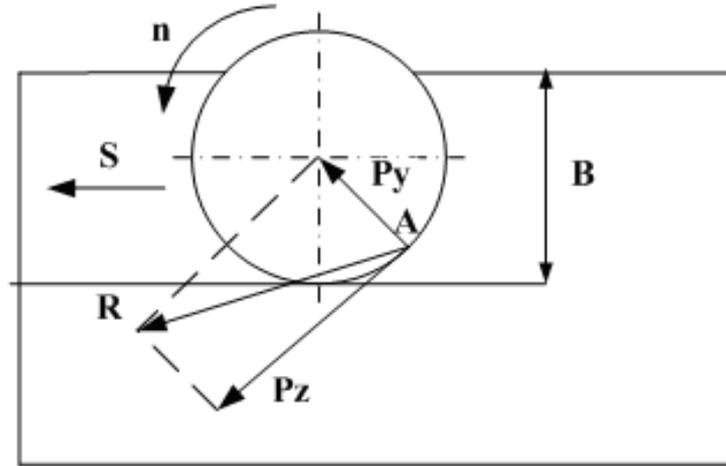


Рисунок 2 – Силы резания при работе концевой фрезой

Пусть система координат, связанная с O , параллельна системе координат сил резания. Таким образом, для описания движения шпиндельного узла как ротора в уравнение 5 добавим силы резания. Тогда формула (5) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\delta} &= P(\delta) + \frac{1}{2} Me\omega^2 \sin \omega t + D_y \\ Q_y &= P(y) + \frac{1}{2} Me\omega^2 \cos \omega t + D_z \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При наличии вибраций инструмента обусловленных дисбалансом, мгновенное значение ширины резания B и подачи на зуб S , зависят от амплитуды колебаний относительно оси шпинделя. Для упрощения математических выкладок примем в дальнейших расчетах $B_h = B + Z$ и $S_h = S + Z$, Z - текущее отклонение оси от исходного положения.

Основываясь на уравнении Лагранжа и принимая что $A \ll B$, приходим к дифференциальным уравнениям движения:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} + \frac{nl^2}{B} \dot{x} + \frac{l^2}{B} P(x) + \frac{l^2}{B} P_y &= \frac{l^2}{B} Me\omega^2 \sin \omega t \\ \ddot{y} + \frac{nl^2}{B} \dot{y} + \frac{l^2}{B} P(y) + \frac{l^2}{B} P_z &= \frac{l^2}{B} Me\omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Введем новые обозначения:

$$\frac{nl^2}{B} = D; \quad Me \frac{l^2}{B} = H; \quad \frac{l^2}{B} P(z) = p(z); \quad \frac{l^2}{B} P(y) = p(y); \quad \frac{l^2}{B} P_y = F(y); \quad \frac{l^2}{B} P_z = F(z); \quad (9)$$

Окончательно уравнение вынужденных колебаний ротора с учетом линейных демпфирующих сил в подшипнике и сил резания принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} + D \dot{z} + p(z) + F(y) &= H\omega^2 \sin \omega t \\ \ddot{y} + D \dot{y} + p(y) + F(z) &= \dot{I} \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В полученной системе, решение уравнений можно искать независимо друг от друга.

В шпиндельном узле МЦС используются подшипники, с предварительный осевым натягом. Нелинейную восстанавливающую силу можно принять [2,3]:

$$P(r) = \frac{c_a(k+r)}{2} \left[\frac{2S}{\sqrt{4(r_{жс} - \frac{d_{ш}}{2})(2\delta - r) - (2\delta - r)^2}} - 1 \right] + P_0 \quad (11)$$

где $P_0 = F_0 \operatorname{ctg} \beta$ - нормальная нагрузка на подшипник,

F_0 - усилие осевого натяга,

β - угол контакта шариков с наружным кольцом подшипника,

$r_{жс}$ - радиус желоба,

$d_{ш}$ - диаметр шарика,

δ - радиальный зазор в подшипнике,

k - константа характеризующая геометрические параметры типа подшипника,

c_a - осевая жесткость,

S - осевой зазор в подшипнике [2,3].

Усилие осевого натяга, радиальный зазор, диаметр шарика, угол контакта шариков с наружным кольцом даются в справочниках на конкретный подшипник. Радиус желоба, осевая жесткость, осевой зазор в подшипнике рассчитываются на основе справочных данных.

Рассуждая, аналогичным способом для оценки сил резания получим:

$$P_z = C_h(B-z)(S-z)^{0.75} \cdot \omega^{0.13} \quad (12)$$

где показатели степени определили по справочнику Косилова-Мещеркова,

коэффициент $C_h = \frac{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^{XPZ} \cdot Z}{D^{qPZ}}$;

Подставляя формулу (11) и (12) в (10) получаем окончательный вид уравнения вынужденных колебаний:

$$\ddot{z} + D \dot{z} + \omega_a^2(k+z) \left[\frac{2S}{\sqrt{4(r_{жс} - \frac{d_{ш}}{2})(2\delta - z) - (2\delta - z)^2}} - 1 \right] + q_0 \sin(\omega t - \varepsilon) + (C_h(B-z)(S-z)^{0.75} \cdot \omega^{0.13}) = H \omega^2 \sin \omega t \quad (13)$$

где $\omega_a^2 = \frac{c_a l^2}{2B}$ - собственная частота колебаний системы,

$q_0 = \frac{P_0 l^2}{B}$ - относительное усилие предварительного осевого натяга [2].

Для нахождения периодического решение нелинейного уравнения был применен известный метод гармонического баланса, предполагая, что в системе только одна гармоника колебаний, тогда в уравнение (13) введем новую переменную.

$$z = A \sin \varphi \quad (14)$$

Введем следующие безразмерные величины: $\Omega_a = \frac{\omega}{\omega_a}$; - безразмерная частота, $\xi = \frac{A}{2\delta}$

- безразмерная амплитуда, $V_0 = P_0 / (\delta c_a)$ - безразмерный натяг, $\Psi = D / \omega_a$ - безразмерный коэффициент демпфирования, $h = H / 2\delta$ - безразмерный дисбаланс, $(\theta + 1) = 2S(a_1 + a_2 k)$ и

$\chi \frac{1}{\delta^2} = \frac{3}{2} S(a_3 + a_4 k)$ -геометрические постоянные, которые определяются конструктивными параметрами подшипника, где a_1, a_2, a_3, a_4 -коэффициенты разложения восстанавливающей силы в биномиальный ряд [2].

Учитывая принятые обозначения уравнения движения ротора, принимает вид:

$$\Omega_a^2 = \theta + \chi \xi^2 + V_0 \frac{1}{\xi} - \sqrt{(h \Omega_a^2 \frac{1}{\xi})^2 - \Psi^2 \Omega_a^2} + (C_{p1} + C_{p2} \xi + C_{p3} \xi^2) \cdot \Omega_a^{0.13} \quad (15)$$

где $C_{p1}; C_{p2}; C_{p3}$; - коэффициенты учитывающие режимы резания.

Анализ полученного выражения показывает, что силы резания оказывают демпфирующие воздействие на вибрационные явления в ШУ. Известные решения такого вида уравнений при $\Psi = 0, h = 0$, т.е. на холостом ходу имеют вид, показанный на рисунке 3.

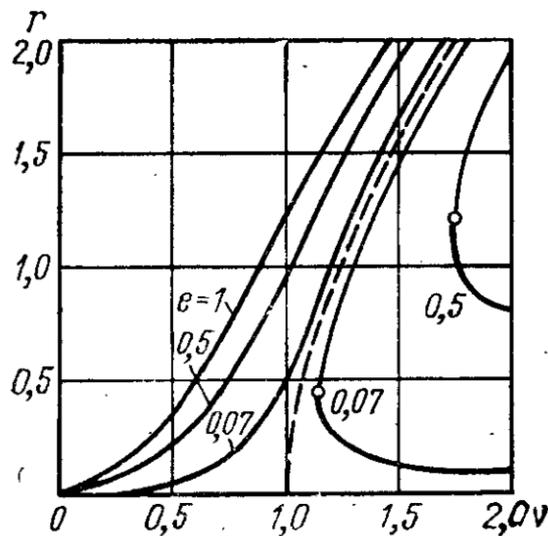


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика ротора

Эти зависимости указывают на сложный характер влияния параметров ШУ на АЧХ, а также на неоднозначность режимов колебаний при изменении частоты вращения шпинделя. На холостом ходу, как видно из рисунка 3, могут возникать вибрации с большой амплитудой, особенно на частотах близких к резонансной частоте. На рабочем ходу на этих же режимах можно ожидать стабилизацию процесса резания. Это объясняется изменением величины зазора или натяга в подшипнике, вызываемых силами резания. Таким образом, силы, возникающие в процессе резания, обладают демпфирующими свойствами в вибрационных явлениях, вызванных дисбалансом системы.

Шпиндельный узел МЦС представляет собой сложную систему. В процессе эксплуатации ШУ происходит износ подшипников качения, втулок, колец и других частей. Из-за этого снижается качество его балансировки, что приводит к возникновению вибраций. Косвенно явление дисбаланса проявляется в снижении качества получаемой поверхности, увеличении вибрации, а также в снижении точности обработки и стойкости инструмента.

В результате экспериментальных исследований, проведенных на станке VMC-600 при обработке детали типа «Плита» с использованием концевой фрезы со сменными пластинами «SEE09T3AFN-E04 H15» фирмы SECO; диаметр фрезы 25 мм, установлена корреляционная связь АЧХ ШУ с допустимым качеством балансировки с зависимостью энергоёмкости обработки от частоты вращения шпинделя. В частности отмечено увеличение энергоёмкости и снижение качества обработки при скорости резания 450-470 м/мин, которая соответствует собственной частоте колебаний ШУ [7].

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенного анализа установлено, что силы резания оказывают воздействие на условия балансировки, что делает необходимым использование математических моделей движения несбалансированного шпинделя, учитывающих силы резания.

2. Предложенная математическая модель динамики неуравновешенного шпиндельного узла учитывает влияние режимов резания на условия балансировки.

3. Установлено, что нарушения балансировки ШУ выражается в увеличении энергоёмкости процесса резания. Оперативный контроль, который осуществляется в современных станках системой ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черпаков, Б. И. Развитие мирового станкостроения в начале XXI века [Текст] / Б. И. Черпаков // Научно-технический журнал «ИТО : Инструмент Технология Оборудование» – 2011 – № 1 – С. 4-9.
2. Кельзон, А. С. Расчет и конструирование роторных машин [Текст] / А. С. Кельзон, Ю. Н. Журавлев. – Л. : Машиностроение, 1977. – 288 с.
3. Ковалев, М. П. Расчет высокоточных шарикоподшипников [Текст] / М. П. Ковалев, М. З. Народец-кий. – М. : Машиностроение, 1975. – 280 с.
4. Левит, М. Е. Балансировка деталей и узлов [Текст] / М. Е. Левит, В. М. Рыженков. – М. : Машиностроение, 1986. – 248 с.
5. Рубинштейн, С. А. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент [Текст] / С. А. Рубинштейн, Г. В. Левант. – М. : Машиностроение, 1968. – 392 с.
6. Тепинкевич, В. К. Металлорежущие станки [Текст] / В. К. Тепинкевич, Н. С. Колев, Л. В. Красниченко, Н. С. Никулин, – М. : Машиностроение, 1973. – 472 с.
7. Жмурин, В. В. Энергетический критерий оценки эффективности режимов резания [Текст] / В. В. Жмурин, В. С. Сальников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №2. – С. 114-120.

Жмурин Владимир Викторович

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Аспирант
Кафедра «Автоматизированные Станочные Системы»
Тел. (4872) 23-53-19
E-mail: Vladimir_zhmurin@mail.ru

Сальников Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Д-р техн.наук, профессор
Кафедра «Автоматизированные Станочные Системы»
Тел.: (4872)35-18-87
E-mail: tst@tsu.tula.ru

V.V. ZHMURIN, V.S. SALNIKOV

INFLUENCE OF QUALITY OF BALANCING ON CUTTING PROCESS

In article the questions connected with balancing of a shpindelny hub are considered. Results of analytical researches about influence of forces of cutting on conditions of balancing of shpindelny hub are given. On their basis the offered mathematical model of dynamics of the unbalanced shpindelny knot, considering forces of cutting.

Keywords: *quality of balancing, imbalance, hydrostatic support, magnetic support, kacheniye support, shpindelny knot, surface roughness, accuracy of processing, radial gap, axial gap, kinetic energy, rotor, эксцентриситет, main moments of inertia of a rotor, equatorial moment of inertia, polar moment of inertia of a rotor, static unbalance.*

BIBLIOGRAPHY

1. B.I. Cherpakov, World Machine-Tool Construction early in the XXI Century – Scientific – Technical Journal “TTE: Tool Technology Equipment” issue № 1, pp.4-9, 2011.
2. A.S. Kelzon, Calculation and Design of Rotor Machines / A.S. Kelzon, Yu.N. Zhuravlyov,-L.: Mechanical Engineering, pp. 288, 1977.
3. M.P. Kovalyov, Computation of Exacting Ball-bearings / M.P. Kovalyov, M.Z. Narodetsky-M.: Mechanical Engineering, pp. 280, 1975.
4. M.E. Levit, Parts and Units Balance / M.E. Levit, V.M. Ryzhenkov – M.: Mechanical Engineering, pp. 248, 1986.
5. S.A. Rubinstein, Fundamentals of Theory of Metal Cutting and Cutting Tool / S.A. Rubinstein, G.V. Levant-M.: Mechanical Engineering, pp. 392, 1968.
6. V.K. Tepinkevich, Machine-Tools / N.S. Kolev, L.V. Krasnichenko, N.S. Nikulin, - M.: Mechanical Engineering, pp. 472, 1973.
7. V.V. Zhmurin, Power criterion in estimation of cutting modes effectiveness / V.V. Zhmurin, V.S. Salnikov, // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. Orel, №2, pp. 114-120, 2010.

Zhmurin Vladimir Viktorovich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
 Department: Automated Manufacturing Systems
 Postgraduate
 Phone: (4872) 23-53-19
 Email: Vladimir_zhmurin@mail.ru

Salnikov Vladimir Sergeevich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
 Department: Automated Manufacturing Systems
 Dr.Sc.tech., prof.
 Phone.: (4872)35-18-87
 E-mail: tst@tsu.tula.ru

УДК 621.99

Р.А. ЗУЙКИН, А.Н. АФОНИН

ВЛИЯНИЕ ПРИПУСКА ПОД НАКАТЫВАНИЕ ПРИ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ РЕЗЬБ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И СИЛЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Описана методика моделирования режущо-деформирующей обработки резьб методом конечных элементов. Выявлен характер влияния припуска под накатывание при режущо-деформирующей обработке трапецеидальных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования. Даны рекомендации по выбору величины припуска.

Ключевые слова: резьба, накатывание, режущо-деформирующая обработка, припуск, метод конечных элементов

Резьбы являются одним из наиболее распространенных элементов деталей машин. К резьбовым деталям часто предъявляются повышенные требования по статической и усталостной прочности. Работоспособность резьбовых деталей в значительной степени зависит от эксплуатационных свойств резьбовых поверхностей. В связи с этим, данные детали часто имеют крупные резьбы, изготавливаются из труднообрабатываемых материалов и подвергаются термическому упрочнению. Наиболее нагруженные ходовые и крепежные резьбы для повышения прочностных характеристик часто имеют трапецеидальную форму.

Перспективными способами формообразования и упрочнения резьб являются способы обработки пластическим деформированием – накатыванием. Накатывание обеспечивает существенное повышение статической и, в особенности, усталостной прочности резьбы. Однако, накатывание резьб имеет ряд недостатков, в частности

достаточно жесткие ограничения по размерам винтовой поверхности и механическим свойствам обрабатываемого материала. При накатывании крупных резьб возникают значительные силы деформирования. Накатывание резьб на предварительно упрочненной термической обработкой заготовке приводит к значительному снижению стойкости инструмента, что делает ее экономически нецелесообразной. Накатывание трапецеидальных резьб также вызывает значительные технологические трудности.

При изготовлении крупных трапецеидальных резьб и трапецеидальных резьб на заготовках из малопластичных материалов наиболее целесообразным является применение комбинированной режущо-деформирующей обработки (накатывания резьб по предварительно нарезанной винтовой канавке) [3, 5]. Срезание части припуска при комбинированной обработке позволяет уменьшить степень деформации при последующем накатывании и снизить силы деформирования. Однако, режущо-деформирующая обработка резьб не нашла широкого применения в промышленности. Причинами этого являются недостаточная изученность данного технологического процесса. В частности отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по определению припуска под накатывание при режущо-деформирующей обработке. От величины припуска зависит степень упрочнения витков резьбы и силы деформирования при накатывании.

Для выявления характера влияния припуска под накатывание при режущо-деформирующей обработке трапецеидальных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования необходимо исследование полей напряжений и деформаций в заготовке при накатывании. Наиболее целесообразным для проведения подобных исследований представляется использование метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Одним из мировых лидеров в области моделирования технологических процессов обработки давлением и резанием с помощью МКЭ является система DEFORM, обладающая возможностью моделирования значительных объемных пластических деформаций и современным, интуитивно понятным графическим интерфейсом.

Для сокращения времени расчетов задача решалась в плоской постановке в модуле DEFORM 2D. Моделировалось внедрение двух витков инструмента в заготовку. Обработка производилась с наиболее распространенной полнопрофильной схемой деформирования [2]. Припуск под накатывание варьировался от полной высоты профиля резьбы (накатывание по целому) до нуля (упрочнение поверхностным пластическим деформированием). Конечноэлементная двумерная модель накатывания и режущо-деформирующей обработки трапецеидальной резьбы шагом 4 мм приведена на рисунке 1.

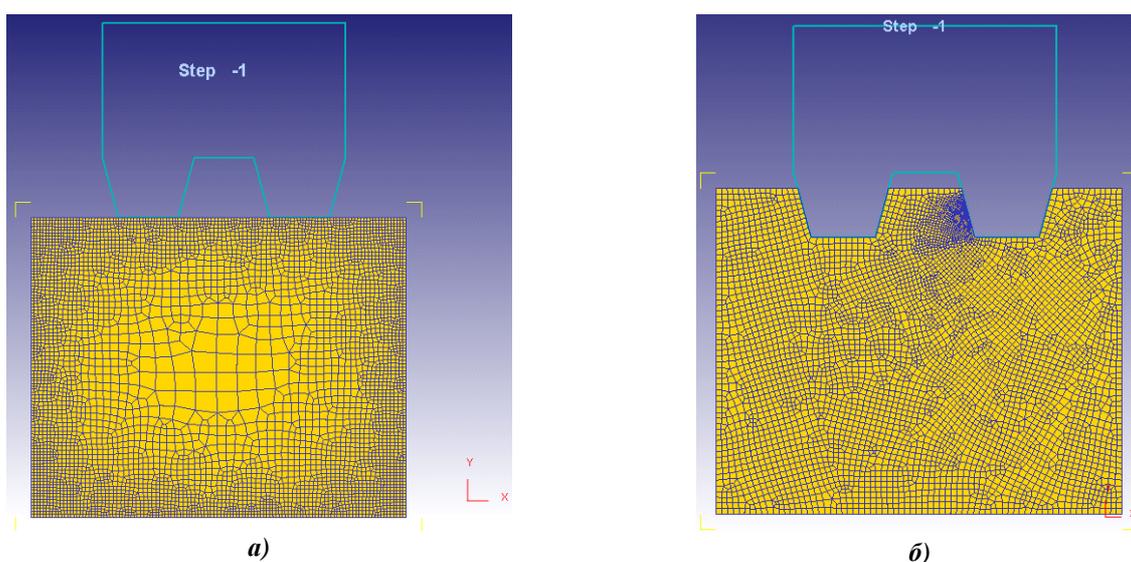


Рисунок 1 – Конечноэлементная модель режущо-деформирующей обработки трапецеидальной резьбы шагом 4 мм:

а) накатывание по целому; б) режущо-деформирующая обработка

Поскольку упругая составляющая деформации заготовки при резбонакатывании составляет не более 0,1%, заготовка для ускорения времени расчета принимается жестко-пластичной. Инструмент при расчете полей напряжений и деформаций в заготовке принимается идеально жестким. Подобные упрощения не вносят существенной погрешности в результаты расчета.

Механические свойства материала заготовки и инструмента задаются путем выбора соответствующей стали из имеющихся в программном комплексе библиотек материалов. При этом используется мультилинейная модель упрочнения. Материал заготовки – сталь 45. Деформации заготовки после обработки резанием не учитывались как несущественные [3].

При определении характеристик контактного взаимодействия объектов модели между заготовкой и инструментом задается кулоново трение с коэффициентом 0,05. Для учета при моделировании возможности образования на вершинах резьбы складок - закатов необходимо задать возможность возникновения контакта заготовка-заготовка.

Поля эквивалентных деформаций, полученные в результате моделирования, приведены на рисунке 2. На рисунке 3 показано распределение эквивалентных деформаций во впадинах трапецеидальной резьбы, подвергшейся режуще-деформирующей обработке, по глубине.

Из результатов моделирования хорошо видно, что деталь, не подвергающаяся лезвийной обработке (а), имеет после накатывания резьбы наибольшие деформации, по сравнению с остальными (б, в, г). При этом, величина максимальных эквивалентных деформаций изменяется от 0,965 до 0,285. Величина эквивалентных деформаций позволяет оценить степень упрочнения витков резьбы [1]. Чем выше деформации, тем выше степень упрочнения.

На рисунке 4 представлено сравнение сил деформирования при режуще-деформирующей обработке резьб с различным припуском под накатывание. Из рисунка следует, что с уменьшением припуска сила деформирования при той же площади контакта инструмента и заготовки снижается. Это вызвано меньшим упрочнением материала заготовки.

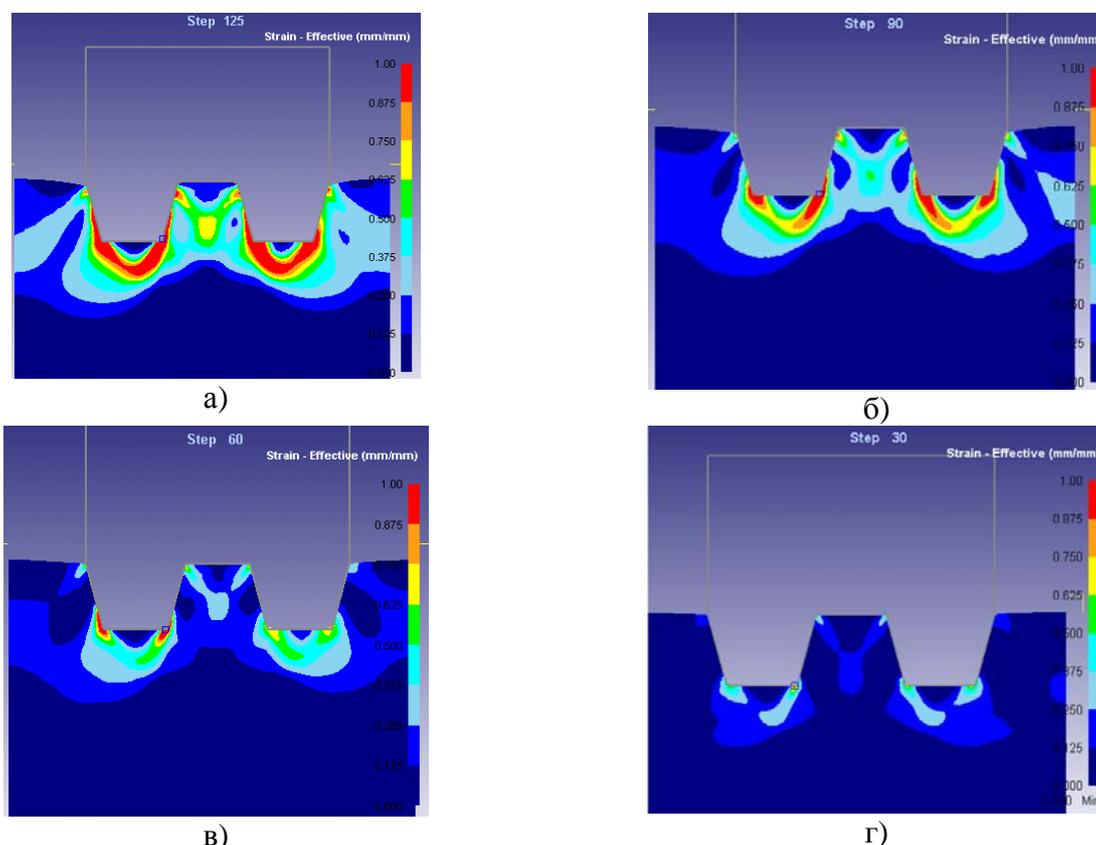


Рисунок 2 – Поля эквивалентных деформаций в детали при различном припуске

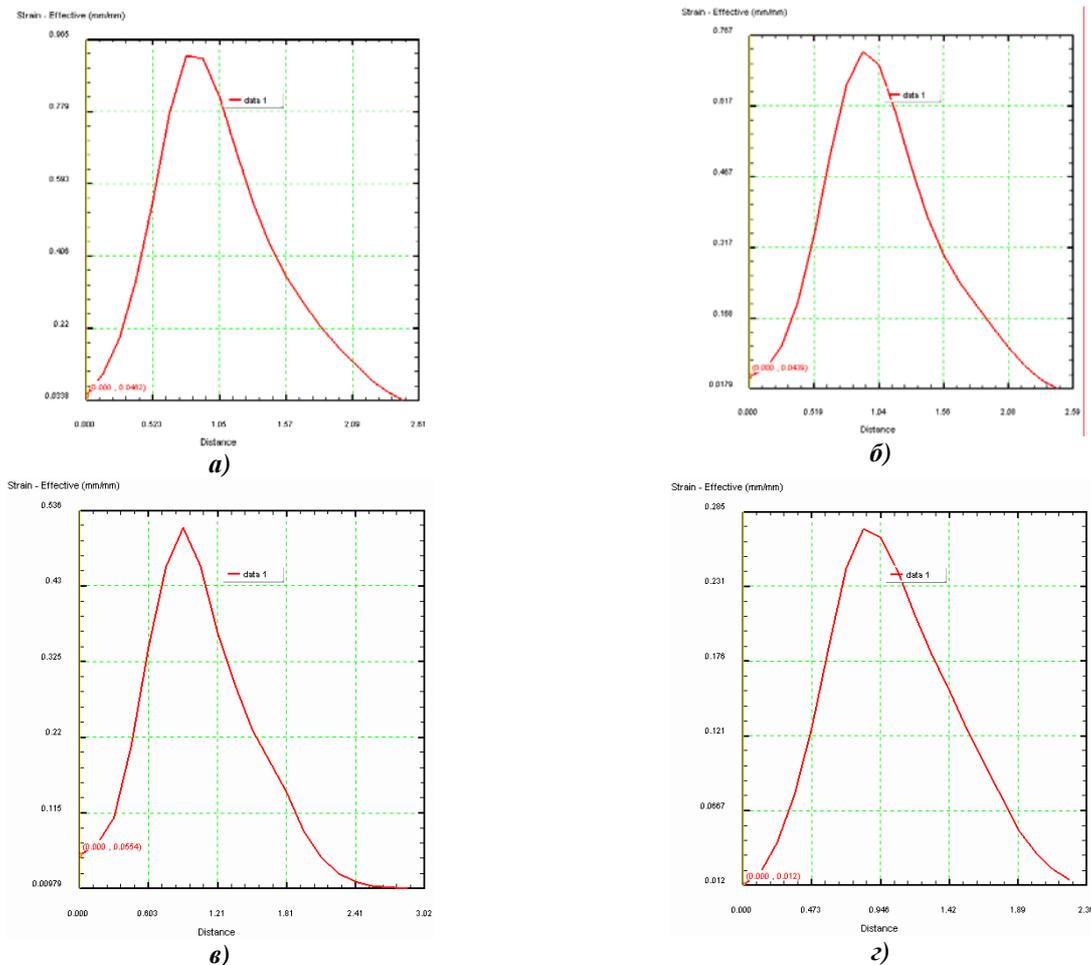


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных деформаций во впадине по глубине

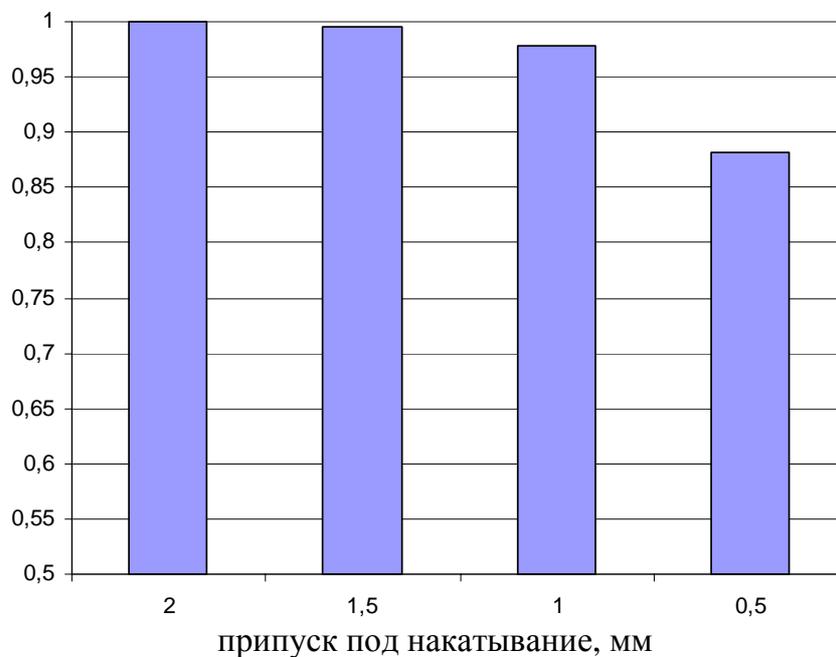


Рисунок 4 – Относительные силы деформирования при различных значениях припуска под накатывание.

Из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что увеличение припуска под накатывание увеличивает степень упрочнения резьбы и силы деформирования. Выбор

величины припуска должен осуществляться в зависимости от требований к степени упрочнения и механических свойств материала заготовки. Большая величина припуска целесообразна для более мягких материалов, меньшая – для материалов с повышенной твердостью и пониженной пластичностью. Разработка конкретных рекомендаций по величине припуска под накатывание требует дополнительных исследований, связанных с проведением вычислительных и натуральных экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин, А. Н. Оценка упрочнения резьбы по результатам компьютерного моделирования резьбо-накатывания [Текст] / А. Н. Афонин // Труды междунар. научно-практ. конф. «Инженерные системы – 2011». – М. : РУДН, 2011. – С. 126-129.
2. Афонин, А. Н. Схемы деформирования при накатывании резьб [Текст] / А. Н. Афонин, А. В. Киричек // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 6/278(577). – С. 39-42.
3. Киричек, А. В. Резьбонакатывание. Библиотека технолога [Текст] / А. В. Киричек, А. Н. Афонин. – М. : Машиностроение, 2009. – 312 с.
4. Киричек, А. В. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки [Текст] : Коллективная монография / С. К. Амбросимов, А. Н. Афонин, А. Р. Ингеманссон [и др.]; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2011. – 328 с.
5. Таурит, Г. Э. Прогрессивные процессы резьбоформирования [Текст] / Г. Э. Таурит, Е. С. Пуховский, С. С. Добрянский. – Киев : Техніка, 1975. – 240 с.

Зуйкин Руслан Александрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Аспирант

Кафедра «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. (4862)54-15-03

E-mail: Zuikin1@mail.ru

Афонин Андрей Николаевич

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Д-р техн.наук, профессор

Кафедра «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. (4862)54-15-03

E-mail: af@au.ru

R.A. ZUYKIN, A.N. AFONIN

INFLUENCE OF A ROUGH TOLERANCE UNDER A ROLLING AT A CUTTING-FORMING HANDLIN OF TRAPEZOIDAL THREADS ON EFFECTIVE STRAINS AND FORCES OF DEFORMATION

The technique of simulation of cutting-forming handling of threads is described by a finite element method. Character of influence of a rough tolerance under a rolling is determined at cutting-forming handling trapezoidal threads on equivalent strains and forces of deformation. Recommendations at the choice of magnitude of a rough tolerance are given.

Keywords: thread, rolling, cutting-forming handling, rough tolerance, finite element method

BIBLIOGRAPHY

1. Afonin A.N. Estimation of hardening of a thread by results of numerical simulation of a thread rolling // Proceedings International scientific-practical conference «Engineering systems - 2011», Moscow: RUDN, 2011. – Pp. 126 – 129.
2. Afonin A.N., Kirichek A.V. Schemes of forming at a threads rolling // News of OrelSTU. A series "Fundamental and application problems of technics and technology", 2009, № 6/278(577). - Pp. 39-42.

3. Kirichek A.V., Afonin A.N. Thread rolling. Library of the technologist. - Moscow: Mashinostroyeniye, 2009. - 312 p.

4. Effective Technologies of Burnishing, Broaching and forming-cutting Handling. The collective monography / S.K. Ambrosimov, A.N. Afonin, A.R. Ingemansson, etc. Edition by A.V. Kirichek. - Moscow: Publishing House "Spectr", 2011. - 328 p.

5. Taurit G.E., Puhovskiy E.S., Dobryanskiy S.S. Progressive processes thread forming. – Kiev: Technika, 1975. – 240 p.

Zuykin Ruslan Aleksandrovich

Polikarpov Technological Institute FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Post-graduate student

Department «Mechanical engineering and design-engineering informatics»

Phone. (4862) 54-15-03

E-mail: Zuikin1@mail.ru

Afonin Andrey Nikolayevich

Polikarpov Technological Institute FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Dr. of Technical Sciences, Professor

Department «Mechanical engineering and design-engineering informatics»

Phone. (4862) 54-15-03

E-mail: af@au.ru

УДК 539.374

А.А. КАМЕНСКИХ, А.А. АДАМОВ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО УЗЛА С ПОЛИМЕРНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

Рассмотрено осесимметричное напряженное состояние сферического контактного узла с полимерной антифрикционной прослойкой. Приведены результаты исследования практической сходимости применяемого конечноэлементного алгоритма. Выявлено влияние ограничений, наложенных на систему, на характер контактного взаимодействия. Установлены закономерности распределения контактного давления и контактного касательного напряжения на поверхности контакта.

***Ключевые слова:** контакт, трение, метод конечных элементов, упругопластичность, осесимметричная задача.*

Многие ответственные промышленные конструкции работают в рамках механики контактного взаимодействия. В настоящее время данная область механики деформированного твердого тела активно развивается. Представление о механике контактного взаимодействия дает ряд монографий [1-5]. Реализация контактных задач имеет большое значение во многих технических прикладных исследованиях. Особое значение имеют задачи с учетом трения на поверхности контакта. Для решения задач контактного взаимодействия предложены эффективные методы решения: метод граничных элементов (МГЭ) [6, 7 и др.], метод конечных элементов (МКЭ) [8, 9 и др.] и комбинированные МГЭ-МКЭ методы [10, 11 и др.].

В данной работе рассматривается работа конструкции опорных частей с шаровым сегментом пролетных строений мостов с точки зрения механики контактного взаимодействия (рис. 1). В расчетную схему включены: верхняя стальная плита с шаровым полированным сегментом – 1, нижняя стальная плита со сферическим вырезом – 2 и разделяющая их сферическая полимерная антифрикционная прослойка с основной поверхностью скольжения ABC – 3.

Моделируется реальная конструкция опорной части с номинальной нагрузкой 2.5 МН, изготовленной ООО «АльфаТех» (г. Пермь) по проекту и с научно-техническим сопровождением ООО «Ко Люмьер Лтд» (г. Москва). При нагружении верхней плиты происходит контактное взаимодействие между упругими стальными плитами 1, 2 с упругопластической прослойкой 3 из антифрикционного полимерного материала на основе фторопласта-4.

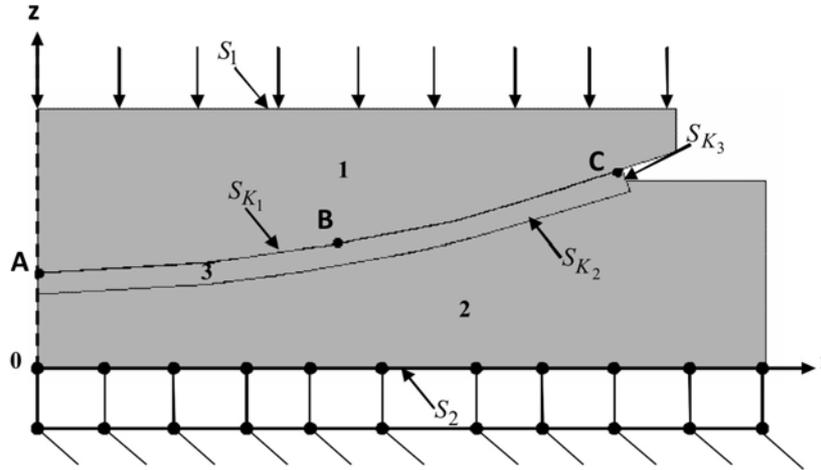


Рисунок 1 – Расчетная схема опорной части с шаровым сегментом

В работе рассматривается три материала антифрикционной прослойки: фторопласт-4 (мат. 1), антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта-4 со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена (мат. 2) и модифицированный фторопласт (мат. 3). Контактные задачи реализуются с учетом трения.

Для анализа условий опирания мостовой конструкции на верхнюю плиту опоры рассмотрено два варианта расчета: 1. равномерно распределенное давление на поверхности S_1 ; 2. дополнительно задано равенство осевых перемещений по координате z на поверхности S_1 – она при нагружении остается плоской.

Контактная задача упругопластичности в данной работе решена в частном случае осесимметричного напряженно-деформированного состояния.

Математическая постановка.

Общая математическая постановка упругого поведения материала включает в себя уравнения равновесия [12]

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0, \quad \bar{x} \in V \tag{1}$$

геометрические соотношения

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right), \quad \bar{x} \in V \tag{2}$$

физические соотношения

$$\sigma = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2\mu \hat{\varepsilon}, \quad \bar{x} \in V_1 \cup V_2 \tag{3}$$

где λ и μ – параметры Ламе,

$\hat{\sigma}$ – тензор напряжений,

$\hat{\varepsilon}$ – тензор деформаций,

\bar{u} – вектор перемещений,

\bar{x} – радиус-вектор произвольной точки расчетного объема,

$I_1(\hat{\varepsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций,

\hat{I} – единичный тензор,

$V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ – расчетный объем,

- V_1 – объём плиты с шаровым сегментом,
- V_2 – объём плиты со сферическим вырезом,
- V_3 – объём полимерной прослойки.

Для описания поведения материала прослойки выбрана деформационная теория пластичности, физические соотношения которой имеют вид [13]:

$$\hat{\sigma} = \frac{2\sigma_u}{3\varepsilon_u} (\hat{\varepsilon} - I_1(\hat{\varepsilon})\hat{I}) + 3KI_1(\hat{\varepsilon})\hat{I}, \quad \bar{x} \in V_3 \quad (4)$$

где $\sigma_u = \sqrt{3I_2(\hat{\sigma})}$ - интенсивность тензора напряжений ($I_2(\hat{\sigma})$ - второй инвариант тензора $\hat{\sigma}$),

$\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{I_2(\hat{\varepsilon})}$ - интенсивность тензора деформаций ($I_2(\hat{\varepsilon})$ - второй инвариант тензора $\hat{\varepsilon}$),

K – объемный модуль упругости,

$\sigma_u = \hat{O}(\varepsilon_u)$ – функциональная зависимость, определяемая диаграммой деформирования при одноосном напряженном состоянии.

Математическая постановка включает также кинематические граничные условия на поверхности S_2

$$u_z = 0, \quad \bar{x} \in S_2 \quad (5)$$

и статические граничные условия на поверхности S_1

$$\hat{\sigma} \cdot \bar{n} = \bar{P}, \quad \bar{x} \in S_1, \quad (6)$$

остальные наружные поверхности являются свободными

$$\hat{\sigma} \cdot \bar{n} = 0. \quad (7)$$

Система уравнений (1) – (7) дополнена граничными условиями на поверхности контакта $S_K = S_{K1} \cup S_{K2} \cup S_{K3}$. Рассмотрены следующие типы контактного взаимодействия:

– проскальзывание с трением:

для трения покоя

$$\sigma_n < 0, \quad \sigma_{n\alpha} < q\sigma_n, \quad \bar{u}^1 = \bar{u}^2, \quad (8)$$

для трения скольжения

$$\sigma_n < 0, \quad \sigma_{n\alpha} = q\sigma_n, \quad u_n^1 = u_n^2, \quad u_\tau^1 \neq u_\tau^2, \quad (9)$$

– отлипание

$$\left| u_n^1 - u_n^2 \right| \geq 0, \quad \sigma_{n\alpha} = \sigma_n = 0, \quad \alpha = 1, 2, \quad (10)$$

– полное сцепление

$$\bar{u}^1 = \bar{u}^2. \quad (11)$$

где q – коэффициент трения,

$\alpha = 1, 2$ – индекс – условные номера двух контактирующих поверхностей,

u_n – перемещения по нормали к соответствующей контактной границе,

u_τ – перемещения по касательной к соответствующей контактной границе,

σ_n – напряжение по нормали к контактной границе (\equiv контактное давление P_{K1} на S_{K1}),

$\sigma_{n\alpha}$ – напряжение по касательной к контактной границе (\equiv контактное касательное напряжение τ_{K1} на S_{K1}).

Во втором варианте исследования система (1) – (11) дополняется статическими ограничениями, наложенными на поверхности S_1 :

$$u_z(r, z) = U = const, \quad \bar{x} \in S_1. \quad (12)$$

Вариант расчета 1 реализуется в рамках системы уравнений (1) - (11), вариант 2 – системы (1) - (12).

Определяющие уравнения

Для изучения механического поведения трех материалов антифрикционной прослойки при сложных многоступенчатых историях деформирования с разгрузками проведены однотипные серии экспериментов на свободное сжатие (при одноосном напряженном состоянии) в диапазоне деформаций сжатия до 10 % и на стесненное сжатие (при одноосном деформированном состоянии) в диапазоне напряжений сжатия до 160 МПа [14].

На основе анализа результатов экспериментов в качестве модели поведения материала была выбрана и идентифицирована модель деформационной теории упругопластичности с упругой объёмной сжимаемостью и нелинейной диаграммой квазиравновесного деформирования при свободном сжатии с минимальной скоростью нагружения.

Для проверки работоспособности выбранной модели поведения материала выполнена серия численных экспериментов по решению краевых задач для испытанных образцов с использованием программного комплекса ANSYS. Установлено, что численный расчет с использованием выбранных определяющих соотношений дает хорошее количественное соответствие результатам эксперимента [15].

Реализация решения и полученные результаты

Реализовано решение осесимметричной контактной задачи, поставленной в п. 1. При помощи программного комплекса ANSYS построены конечно-элементные модели с использованием деформационной теории упругопластичности. Используется осесимметричный 8 узловый элемент, обладающий аппроксимацией 2-го порядка и двумя неизвестными перемещениями в каждом узле.

В прослойке произведено сгущение сетки конечных элементов, в нижней и верхней плитах размер элементов градиентно увеличивается. Исследовалась сходимость решения от количества слоев элементов по толщине прослойки N , рассмотрено четыре варианта: 2 и 4 элемента, 8 и 16 элементов. При уменьшении размера элемента по толщине прослойки уменьшается характерный размер элементов прослойки.

На поверхностях соприкосновения верхней и нижней плит с прослойкой нанесены контактные конечно-элементные пары, позволяющие учесть трение. На конечно-элементную модель наложены статические и кинематические граничные условия, соответствующие реальной номинальной нагрузке при эксплуатации опорной части с шаровым сегментом в пролетных строениях мостов: к верхней плите прикладывается распределенная вертикальная нагрузка с уровнем $P = 54$ МПа.

Рассмотрена сходимость решения контактной задачи по параметрам контакта – границе областей сцепления-скольжения, контактному давлению и контактному касательному напряжению. Наибольший интерес эти величины представляют на контактной поверхности прослойки S_{K1} , по которой осуществляется поворот сферического сегмента верхней плиты. Влияние количества элементов по толщине прослойки N на относительное контактное давление P_{K1}/P и относительное контактное касательное напряжение τ_{K1}/P (отнесены к прикладываемой нагрузке) для вариантов 1 и 2 на примере мат. 3 показаны на рисунке 2. Сходимость решения также рассмотрена в [16].

Результаты, представленные на рисунке 2, показывают их численную сходимость для обоих вариантов расчетов, поэтому можно ограничиться числом слоев конечных элементов N равным 8 или 16.

Рассмотрим характер распределения относительного контактного давления P_{K1}/P и относительного касательного напряжения τ_{K1}/P для трех исследуемых материалов в вариантах 1 и 2 при $N = 16$ (рис. 3).

Полученное во всех вариантах расчетов соотношение величин P_{K_1}/P и τ_{K_1}/P , поля деформаций свидетельствуют о близости напряженно-деформированного состояния полимерной прослойки в зоне сцепления к состоянию стесненного сжатия, реализованного при испытаниях материалов [14].

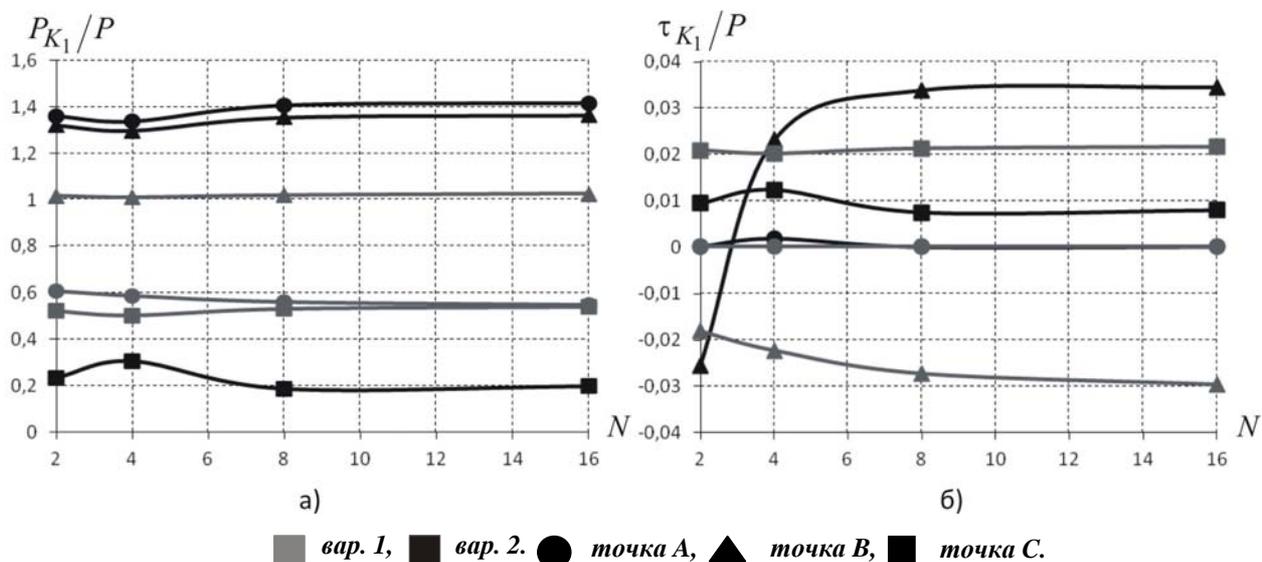


Рисунок 2 – Относительное контактное давление: а) и касательное напряжение – б) в точках А, В, С

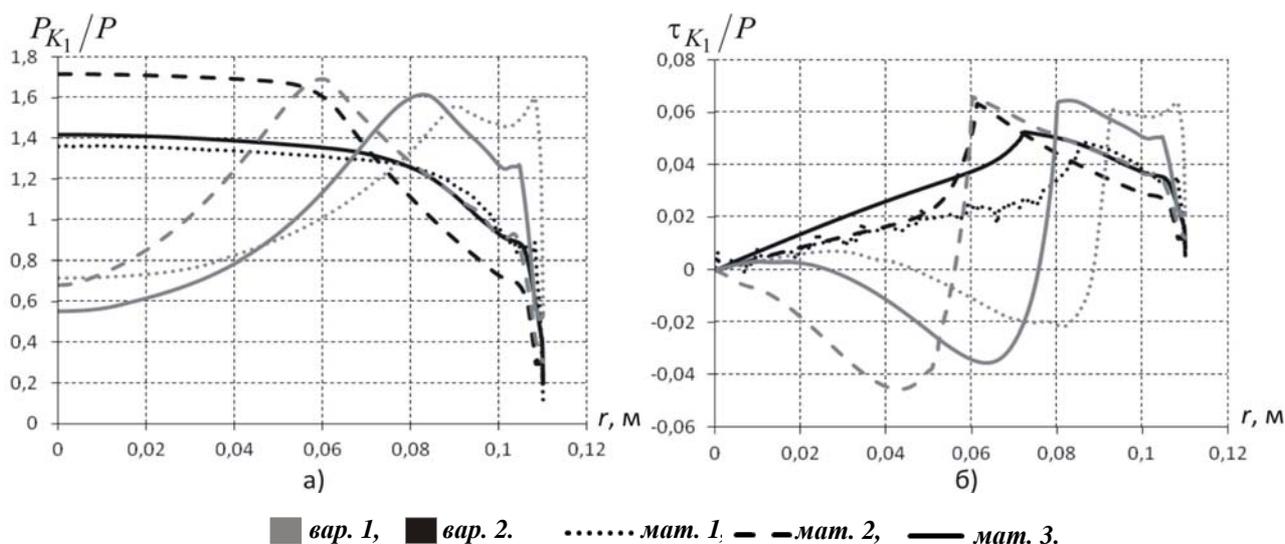


Рисунок 3 – Относительное контактное давление: а) и касательное напряжение; б) на S_{K_1}

Для опорной части варианта 1 со всеми рассмотренными материалами полимерной прослойки имеем существенно неоднородное распределение относительного контактного давления P_{K_1}/P в центральной части сферического сегмента: минимум в центре с максимумом в зоне перехода контактных состояний (смена зоны сцепления на зону проскальзывания), ближе к краю прослойки контактное давление падает за счет проявления сдвиговых степеней свободы при деформации полимера.

Относительные касательные напряжения τ_{K_1}/P в этом варианте граничных условий на S_1 также имеют выраженные минимумы и максимумы со сменой знака в окрестности границы сцепления-скольжения.

Причиной столь неоднородного распределения относительных контактных давлений и касательных напряжений при этом варианте граничных условий на поверхности S_1 относительно тонкой верхней стальной плиты является её осесимметричный изгиб, поверхность S_1 становится выпуклой вверх.

Для варианта 2 относительное контактное давление P_{K_1}/P имеет слабо выраженный максимум в центральной части сферического сегмента, причем для материалов 1, 3 его величина \sim на 10 % ниже соответствующего максимума варианта 1. Относительные касательные напряжения τ_{K_1}/P монотонно растут до границы перехода контактных состояний, а затем начинают уменьшаться до нуля на свободном крае.

Границы сцепления-скольжения верхней плиты относительно полимерной прослойки для вариантов 1 и 2 также отличаются, причем для каждого варианта расчета наблюдается их зависимость (справедливо также для P_{K_1}/P и τ_{K_1}/P) от свойств материала антифрикционной прослойки при одинаковом задаваемом коэффициенте трения.

Таким образом, на основе численного решения осесимметричной контактной задачи упругопластичности выполнен анализ напряженно-деформированного состояния узла «плита-прослойка-плита» в рамках механики контактного взаимодействия, выполнена численная оценка сходимости полученных результатов.

Установлены границы зон сцепления-скольжения, определены величины и характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения на поверхностях контакта, рассмотрено влияние свойств трёх материалов и конструктивного ограничения по искривлению опорной поверхности верхней плиты на полученные численные результаты.

По результатам выполненного исследования в качестве модели, более верно отражающей работу конструкции узла «плита-прослойка-плита», вариант 2 с ужесточением верхней плиты рекомендован для реализации условий опирания на верхнюю плиту рассмотренной опоры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 13.G25.31.0093 от 22.10.2010 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 12-Т-1-1004 Программы фундаментальных исследований ОЭММиПУ РАН «Многоуровневое исследование свойств и поведения перспективных материалов для современных узлов трения», рук. акад. И.Г.Горячева и в рамках Программы поддержки ведущих научных школ (НШ-5389.2012.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В.М. Введение в механику контактных взаимодействий [Текст] / В.М. Александров, М.И. Чебаков. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с.
2. Айзикович, С.М. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред [Текст] / С.М. Айзикович, В.М. Александров, А.В. Белоконов, Л.И. Кренин, И.С. Трубочник – М.: Физматлит, 2006. – 237 с.
3. Богданов, Г.И. Опорные части мостов. Ч. 1 [Текст]: Учеб. пособие для студентов вузов / Г.И. Богданов, С.С. Ткаченко, С.А. Шульман. – СПб.: Петербургский гос. университет путей сообщения, 2006. – 32 с.
4. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия [Текст] / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 479 с.
5. Механика контактных взаимодействий [Текст] / Под редакцией Воровича И.И., Александрова В.М. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
6. Méchain-Renauda, C. BEM solution of two dimensional unilateral contact problems with friction by a new approach [Text] / C. Méchain-Renauda, A. Cimetière //Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2003. – Vol. 27. – P. 269–277.
7. Rodríguez-Tembleque, L. 3D frictional contact of anisotropic solids using BEM [Text] / L. Rodríguez-Tembleque, F.C. Buroni, R. Abascal, A. Sáez //European Journal of Mechanics A/Solids. – 2011. – Vol. 30. – P. 95-104.
8. Khoei, A.R. An enriched finite element algorithm for numerical computation of contact friction problems [Text] / A.R. Khoei, M. Nikbakht //International Journal of Mechanical Sciences. – 2007 – Vol. 49. – P. 183–199.
9. Li, Y. An adaptive NS/ES-FEM approach for 2D contact problems using triangular elements [Text] / Y. Li,

G.R. Liu, G.Y. Zhang //Finite Elements in Analysis and Design. – 2011. – Vol. 47, Issue 3. – P. 256–275.

10. González, J.A. A formulation based on localized Lagrange multipliers for BEM–FEM coupling in contact problems [Text] / J.A. González, K.C. Park, C.A. Felippa, R. Abascal //Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2008. – Vol. 197. – P. 623–640.

11. Rodríguez-Tembleque, L. A FEM–BEM fast methodology for 3D frictional contact problems [Text] / L. Rodríguez-Tembleque, R. Abascal //Computers and Structures. – 2010. – Vol. 88. – P. 924–937.

12. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

13. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов [Текст]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

14. Адамов, А.А. Экспериментальное исследование механического поведения композитов на основе фторопласта, работающих при больших давлениях в тонких слоях [Электронный ресурс] / А.А. Адамов // Мат. VII Российской научно-техн. конф. «Механика микронеоднородных материалов и разрушение». – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2012. – Электронный оптический диск, вкладка «Публикации». – 7 с.

15. Каменских, А.А. Численный анализ контактного напряженного состояния опорных частей с шаровым сегментом [Текст] / А.А. Каменских, Н.А. Труфанов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011, Т. 13, №4(4). – С. 960-965.

16. Каменских, А.А. Напряженное состояние в контактной прослойке опорной части с шаровым сегментом [Текст] / А.А. Каменских // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012, №1. – С. 31-42.

Каменских Анна Александровна

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Аспирант, инженер кафедры «Вычислительная математика и механика»

Email: anna_kamenskih@mail.ru.

Адамов Анатолий Арсангалеевич

ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИМСС УрО РАН

Email: adamov@icmm.ru.

A.A. KAMENSKIH, A.A. ADAMOV

NUMERICAL INVESTIGATION OF SPHERICAL CONTACT SYSTEM WITH A POLYMERIC ANTIFRICTIONAL INTERLAYER

The axisymmetric tension of spherical contact construction with a polymeric antifrictional interlayer is considered. Results of research of practical convergence of the applied finite element algorithm are given. Influence of the imposed restrictions on system on character of contact interaction is revealed. Regularities of distribution of contact pressure and contact tangential stress on a contact surface are established.

Keywords: *contact, friction, finite element method, elastoplastic, axisymmetric problem.*

Kamenskih Anna Aleksandrovna

Perm National Research Politechnical University

Postgraduate student, engineer of the Department of Computational Mathematics and Mechanics

Email: anna_kamenskih@mail.ru.

Adamov Anatoly Arsangaleevich

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

Doctor of physical and mathematical sciences, senior scientist, head scientist ICMM UB RAS

Email: adamov@icmm.ru.

BIBLIOGRAPHY

1. Alexandrov, V.M. Introduction to the mechanics of contact interactions [Text] / V.M. Aleksandrov, M.I. Chebakov. - Rostov-on-Don "TSVVR", 2007. - 114 p.

2. Aizikovich, S.M. Contact problems of elasticity theory for inhomogeneous media [Text] / S.M. Aizikovich, V.M. Alexandrov, A.V. Belokon, L.I. Krenev, J.S. Trubchik – M.: Fizmatlit, 2006. - 237 p.

3. Bogdanov, G.I. Bearing of the bridges. Part 1 [text]: Textbook guide for students / G.I. Bogdanov, S.S. Tkachenko, S.A. Shulman. - St. Petersburg.: St. Petersburg State. University of Transport, 2006. - 32.

4. Goryacheva, I.G. The mechanics of frictional interaction [Text] / I.G. Goryacheva. - Moscow: Nauka, 2001. - 479 p.
5. The mechanics of contact interactions [Text] / edited by I.I. Vorovich, V.M. Alexandrov. - Moscow: Nauka, 1966. - 708 p.
6. Méchain-Renauda, C. BEM solution of two dimensional unilateral contact problems with friction by a new approach [Text] / C. Méchain-Renauda, A. Cimetière //Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2003. – Vol. 27. – P. 269–277.
7. Rodríguez-Tembleque, L. 3D frictional contact of anisotropic solids using BEM [Text] / L. Rodríguez-Tembleque, F.C. Buroni, R. Abascal, A. Sáez //European Journal of Mechanics A/Solids. – 2011. – Vol. 30. – P. 95-104.
8. Khoei, A.R. An enriched finite element algorithm for numerical computation of contact friction problems [Text] / A.R. Khoei, M. Nikbakht //International Journal of Mechanical Sciences. – 2007 – Vol. 49. – P. 183–199.
9. Li, Y. An adaptive NS/ES-FEM approach for 2D contact problems using triangular elements [Text] / Y. Li, G.R. Liu, G.Y. Zhang //Finite Elements in Analysis and Design. – 2011. – Vol. 47, Issue 3. – P. 256–275.
10. González, J.A. A formulation based on localized Lagrange multipliers for BEM–FEM coupling in contact problems [Text] / J.A. González, K.C. Park, C.A. Felippa, R. Abascal //Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2008. – Vol. 197. – P. 623–640.
11. Rodríguez-Tembleque, L. A FEM–BEM fast methodology for 3D frictional contact problems [Text] / L. Rodríguez-Tembleque, R. Abascal //Computers and Structures. – 2010. – Vol. 88. – P. 924–937.
12. Timoshenko, S.P. Theory of Elasticity [Text] / S.P. Timoshenko, J. Goodyear. - Moscow: Nauka, 1979. - 560 p.
13. Malinin, N.N. Applied theory of plasticity and creep. A textbook for university students [text]. - Ed. 2nd, revised. and add. - Moscow: Mashinostroenie, 1975. - 400.
14. Adamov, A.A. Experimental study of mechanical behavior of composites based on fluoroplasticworking at high pressures in thin layers [electronic resource] / A.A. Adamov // Mat. VII Russian scientific and technical. conference. "The mechanics of microheterogeneous materials and destruction." - Ekaterinburg: RAS UB IES, 2012. - E-optical disk, tab "Publications." - 7.
15. Kamenskih, A.A. Numerical analysis of contact stressed state with ball segment bearings [Text] / A.A. Kamenskih, N.A. Trufanov // Proceedings of Samara bearings Scientific Center, Russian Academy of Sciences. - 2011, V. 13, № 4 (4). - P. 960-965.
16. Kamenskih, A.A. The state of stress in the interlayer contact with ball segment bearings [Text] / A.A. Kamenskih // Bulletin of PNIPU. Mechanics. - 2012, № 1. - P. 31-42.

УДК 621.914+621.992.5

С.А. МАРКИН, О.С. ПОДРЕЗОВА, С.И. БРУСОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРИПУСКА МЕЖДУ ПРОХОДАМИ

В статье проведено исследование динамических погрешностей фрезерования винтовой поверхности при многопроходной обработке, произведено сравнение с традиционной однопроходной обработкой. Сделаны выводы об их зависимости от амплитуды колебаний составляющих силы резания и возможности использования подобных схем разделения припуска для снижения технологических погрешностей получаемой винтовой поверхности.

***Ключевые слова:** винтовая поверхность, сила резания, многопроходная обработка, погрешности механической обработки.*

Детали, рабочие поверхности которых описаны винтовыми образующими, широко используются в различных машинах: одни из них работают в зацеплении и служат или для изменения частоты вращения, либо для преобразования вращательного движения в поступательное, реже для превращения поступательного движения во вращательное (косозубые зубчатые передачи, червячные передачи, ходовые винты и т.п.), в других – винтовые поверхности выполняют самостоятельные функции: рабочие поверхности в объемных камерных счетчиков, в винтовых насосах для добычи и перекачке нефтепродуктов, поверхности металлообрабатывающих инструментов и т.д. [1].

Изготовление таких деталей является сложным процессом, требующим особого подхода для каждой отдельной поверхности. Процесс обработки винтовой поверхности характеризуется большим количеством различных кинематических схем и методов обработки; сложностью профилирования режущих кромок инструмента, в особенности для обработки винтовых канавок с большим углом подъема винтовой поверхности и криволинейным профилем; высокими требованиями к качеству обработанной поверхности, к кинематической точности и погрешностям профиля даже на этапе предварительного формообразования.

Большое разнообразие профилей и параметров винтовых канавок деталей и изделий, значительное число используемых схем резания, а также отсутствие методик анализа процесса с выходом на параметры качества обработки и производительность осложняют выбор оптимального метода обработки конкретной винтовой поверхности и требуют проведения большого объема вычислений с целью определения режимов обработки, обеспечивающих выполнение точностных требований.

Одним из методов снижения погрешностей обработки винтовых поверхностей с высокими требованиями по точности профиля и шага является применение обработки в несколько проходов. Однако определение участков режущих лезвий инструмента, снимающих оставшийся от предыдущего прохода припуск, толщин срезаемых ими слоев, направления и абсолютной величины возникающей при этом силы резания для фрез с криволинейными режущими лезвиями, достаточно сложная задача. Для этого необходимо определить силу резания на каждом элементарном участке всех зубьев фрезы, участвующих в резании.

На основе математического отображения схемы резания для обработки винтовой поверхности с использованием подходов дифференциальной геометрии и векторного анализа можно определить кинематические изменения переднего и заднего углов, угла наклона режущей кромки, а также толщину срезаемых слоев на всех участках режущих кромок в любой момент работы зуба инструмента при различных режимах обработки на первом и последующих проходах [1]:

$$\begin{aligned} x_i &= \varphi(L)\cos \omega + r_i \sin \varphi(V)\sin \omega + p \varphi(S); \\ y_i &= [A_\omega + h_j - r_i \cos \varphi(V)]\cos \varphi(S) - [\varphi(L)\sin \omega - r_i \sin \varphi(V)\cos \omega]\sin \varphi(S); \\ z_i &= [A_\omega + h_j - r_i \cos \varphi(V)]\sin \varphi(S) + [\varphi(L)\sin \omega - r_i \sin \varphi(V)\cos \omega]\cos \varphi(S), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varphi(L)$ – расстояние от i -ой секущей плоскости, перпендикулярной оси фрезы, до центра фрезы;

r_i – радиус фрезы в i -ой секущей плоскости, перпендикулярной оси фрезы;

$\varphi(V)$ – угол поворота фрезы;

ω – угол установки фрезы;

A_ω – расстояние между осью фрезы и осью винта;

$\varphi(S)$ – угол поворота винта;

p – винтовой параметр, связанный с шагом винтовой поверхности соотношением $p = P/2\pi$ (P – шаг винтовой поверхности);

h_j – величина припуска, оставляемого на последующие проходы.

При этом должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} r_n &> \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}; \\ a_i &> 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты профиля дисковой фрезы в i -ом сечении;

r_n – наружный диаметр заготовки;

a_i – величина толщины, срезаемая i -ым участком профиля инструмента.

Математическое отображение схемы резания при фрезеровании винтовой поверхности на последнем проходе [2]:

$$\begin{aligned} x &= \varphi(L)\cos \omega + r_i \sin \varphi(V)\sin \omega + p \varphi(S); \\ y &= [A_\omega - r_i \cos \varphi(V)]\cos \varphi(S) - [\varphi(L)\sin \omega - r_i \sin \varphi(V)\cos \omega]\sin \varphi(S); \\ z &= [A_\omega - r_i \cos \varphi(V)]\sin \varphi(S) + [\varphi(L)\sin \omega - r_i \sin \varphi(V)\cos \omega]\cos \varphi(S), \end{aligned} \quad (3)$$

при этом необходимо выполнение следующего дополнительного условия:

$$r_i^{j-1} > \sqrt{(x_i^j)^2 + (y_i^j)^2 + (z_i^j)^2}, \quad (4)$$

где r_i^{j-1} – радиус винтовой поверхности в i -ой точке после предыдущего прохода;
 j – номер прохода.

Составляющие силы резания при обработке винтовой поверхности, действующие на участок режущего лезвия в конкретный момент времени, определяются через удельные силы резания как функцию толщины срезаемого слоя и рабочих углов при этом толщина срезаемого слоя и кинематические изменения рабочих углов считаются постоянными по длине рассматриваемого участка.

Выражение для определения составляющих силы резания имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} P_Z &= \sum \Delta P_Z \Delta b K_{cl}; \\ P_Y &= \sum \Delta P_Y \cos \sigma \cos \omega \Delta b K_{cl}; \\ P_X &= \sum \Delta P_Y \sin \sigma \sin \omega \Delta b K_{cl}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta P_Z, \Delta P_Y$ – удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины режущего лезвия;

Δb – элемент длины режущего лезвия, в пределах которого значения толщины срезаемого слоя, переднего и заднего углов с учетом кинематических изменений считаются постоянными;

K_{cl} – коэффициент сложности формирования стружки, учитывающий условия стружкообразования при несвободном резании;

σ – угол между межосевым перпендикуляром и нормалью к режущему лезвию в пределах рассматриваемого элемента.

Расчеты составляющих силы резания приведены для случая двухпроходной обработки дисковой фрезой ротора ведущего трехвинтового насоса 3В16/2,5 с параметрами: профиль боковых поверхностей винтовой канавки описан по укороченной эпициклоиде; число заходов $k = 2$; угол подъема винтовой поверхности $\omega = 0,7536$ рад, наружный диаметр $d_n = 55$ мм, внутренний диаметр $d_g = 33$ мм, шаг винтовой линии $P = 110$ мм; материал заготовки – сталь 18ХГТ, геометрические характеристики инструментов $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, частота вращения фрезы $n = 200$ об/мин, частота вращения заготовки $n_3 = 1$ об/мин. Припуск между первым и вторым проходами поделен в соотношении $0,75(d_n - d_g)/2$ к $0,25(d_n - d_g)/2$ в направлении межосевого перпендикуляра. Профиль дисковой фрезы определен в соответствии с методикой, изложенной в [2].

По сравнению с однопроходной обработкой амплитуда колебаний силы резания при двух- и трехпроходной обработке снижается в зависимости от величины припуска на 10–15%, а на третьем проходе – в 1,5 раза, что позволяет достигать более высокого качества получаемой винтовой поверхности [3].

При фрезеровании винтовой поверхности дисковым инструментом под действием составляющих силы резания P_Z и P_Y и упругих отжатий в технологической системе появляются погрешности, которые могут вызвать искажения профиля винтовой поверхности (рис. 1).

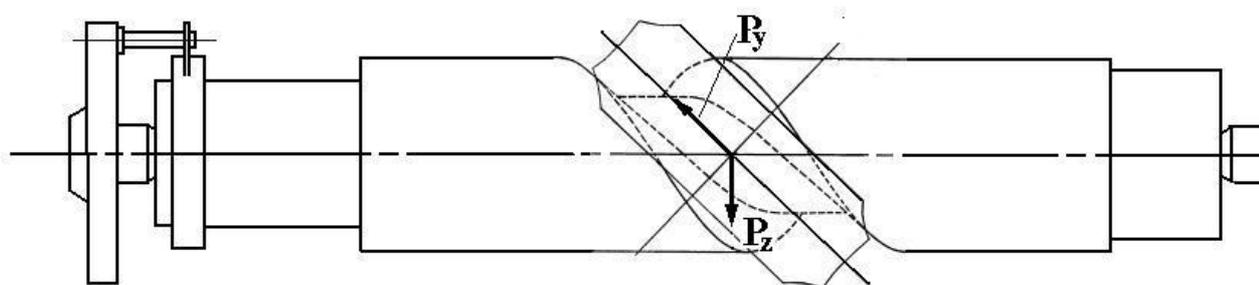


Рисунок 1– Составляющие силы резания, действующие на заготовку при фрезеровании винтовой поверхности дисковой фрезой

Погрешности обработки обусловлены упругими отжатиями инструмента и детали, а также их динамическими прогибами.

Суммарную погрешность обработки можно определить как сумму следующих составляющих:

$$\Delta = \delta h_o + \delta h_e + f_o + f_e; \quad (6)$$

где δh_o – упругое отжатие оправки;

δh_e – отжатие винта;

f_o – динамический прогиб оправки;

f_e – динамический прогиб винта.

Для случая фрезерования заготовок данного вида значительная доля в суммарной погрешности обработки обусловлена динамическими перемещениями сечения заготовки в точке приложения силы резания. Воздействие силы резания при обработке винтовой поверхности вызывает изгибные динамические деформации заготовки, изгибные деформации фрезерной оправки, а также упругие отжатия заготовки и оправки вследствие конечной жесткости опор. Отжатия опор резьбофрезерного станка определяются их жесткостью и величиной действующей силы резания.

Динамический прогиб заготовки можно определить, рассмотрев дифференциальное уравнение колебаний механической системы с одной степенью свободы при наличии диссипативных сил. При этом изгибающая сила $P(\tau)$ действует с частотой ω_e .

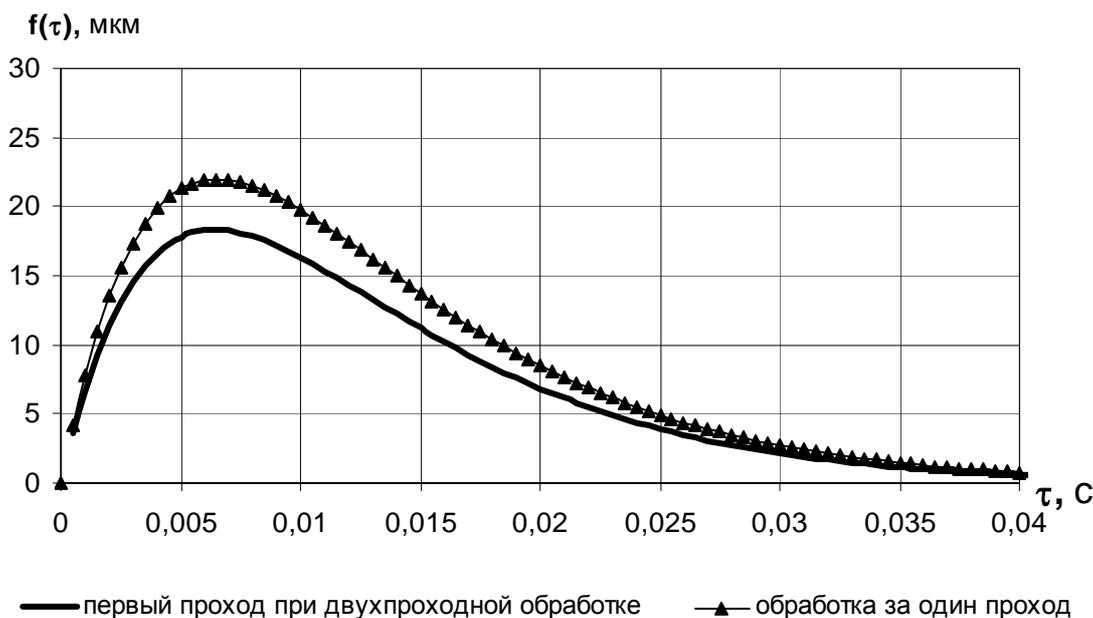


Рисунок 2 – Динамические погрешности заготовки при одно- и многопроходном фрезеровании винтовой поверхности дисковой фрезой

Решение уравнения (2) для случая действия произвольной силы без учета демпфирования при нулевых начальных условиях (перемещение и скорость в начале периода при $T = 0$ равны нулю):

$$f(\tau) = \frac{1}{m\omega_c} \int_0^t P(\tau) \sin \omega_c(t - \tau) d\tau \approx \frac{1}{m\omega_c} \sum_{\tau=0}^t P(\tau + \Delta\tau) \cdot \sin \omega_c(t - \tau - \Delta\tau) \cdot \Delta\tau. \quad (7)$$

где $\Delta\tau$ – фиксированный шаг по оси τ .

Таким образом, в соответствии с уменьшением амплитуды колебания силы резания при многопроходной обработке по сравнению с однопроходной, динамические погрешности обработки, как доминирующие в суммарной погрешности обработанной винтовой поверхности, также уменьшаются на первом проходе на 20–25%, а на последнем – до 50%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусов, С.И. Комплексный анализ параметров лезвийной обработки винтовых поверхностей [Текст] / С.И. Брусов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 128 с.
2. Лашнев, С.И. Профилирование инструмента для обработки винтовых поверхностей [Текст]. – М.: Машиностроение, 1965. – 152 с.
3. Маркин, С.А. Исследование схем распределения припуска при многопроходной обработке винтовых канавок [Текст] / С.А. Маркин, С.И. Брусов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники технологии. №2/3 (286). – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011. – С. 94–98.

Маркин Сергей Александрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Магистрант
Тел: (4862)541503
E-mail: bsi16177@gmail.com

Подrezова Ольга Сергеевна

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Магистрант
Тел: (4862)541503
E-mail: bsi16177@gmail.com

Брусов Сергей Иванович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Канд.техн.наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
Тел: (4862)541503
E-mail: bsi16177@gmail.com

S.A. MARKIN, O.S. PODREZOVA, S.I. BRUSOV

RESEARCH OF THE PROCESSING QUALITY AT ANY DISTRIBUTION OF THE CUT LAYER ON MULTIPASS MILLING OF THE HELIX SURFACES

Research of dynamic errors is conducted in article at milling of a helix surface by multi-pass processing, comparison with traditional single-pass processing is made. Conclusions are drawn on changes of amplitudes of fluctuations of components of cutting force and possibility of use of similar schemes of division of cut layer for decrease in technological errors of a helix surface.

Keywords: a helix surface, cutting force, multi-pass processing, milling errors.

BIBLIOGRAPHY

1. S.I. Brusov, Complex Analysis of Helical Surface Edge Cutting Parameters [Text]/ S.I. Brusov, A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov.-M.: Mechanical Engineering-1, pp. 128, 2006.
2. S.I. Lashnev, Tool Profiling for Helical Surfaces Machining [Text].-M.: Mechanical Engineering, pp.152, 1965.
3. S.A. Markin, Analysis of allowance distribution circuits at multiple-cut operation of helical grooves [Text] / S.A. Markin, S.I. Brusov // Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology. №2/3 (286).- Orel: FSEI HVT "State University – ESPC", pp. 94-98, 2011.

Markin Sergey Alexandrovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Undergraduate
Phone: (4862) 541 503
E-mail: bsi16177@gmail.com

Podrezova Olga Sergeyevna

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Undergraduate
Phone: (4862) 541 503
E-mail: bsi16177@gmail.com

Brusov Sergey Ivanovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Can.Sc.tech., Assistant Professor, Chief of the Dep. Engineering Technique and Design-Technological Informatics
Phone: (4862) 541 503
E-mail: bsi16177@gmail.com

УДК621.923.4

А.В. ТЮХТА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦЫ ШЛАМА СО ШТОРОЙ ИЗ СОЖ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА

В данной статье рассмотрена математическая модель взаимодействия частиц шлама со шторой из СОЖ при плоском шлифовании периферией круга с подачей СОЖ комбинаторным способом. Математическая модель позволяет с большей точностью рассчитать максимальные размеры стружки, срезаемой единичным зерном шлифовального круга, а также обеспечивает прогнозирование результатов такого взаимодействия и расчет эффективной толщины потока жидкости.

Ключевые слова: плоское шлифование, комбинаторный способ подачи СОЖ, штора из СОЖ.

Ранее была разработана математическая модель, позволяющая определить максимально возможный размер срезаемой стружки [1]. Однако, данная модель имела недостаток, заключающийся в том, что стружка рассматривалась как цельный шар, однако, в ряде последних работ [2] доказывается, что стружка если и имеет форму шара, то этот шар полый внутри.

Поэтому ниже представлена математическая модель определения параметров недробленной стружки, срезанной единичным зерном.

В работах [3,4,5,6] представлены математические модели, позволяющие определить размеры срезаемой стружки, однако в данных моделях не учитывалась стружка, не

подвергшаяся дроблению. Поэтому принять эти модели для нашего исследования невозможно.

При расчете использовано два допущения, принятых в большинстве опубликованных работ [3, 7]:

1. Кинематические соотношения, касающиеся поперечного сечения стружки, рассматриваются в одной плоскости (торцовом сечении круга);

2. Исходная поверхность детали гладкая – ее профиль представляет собой горизонтальную прямую линию (для плоского шлифования).

Первое допущение связано с кинематикой универсальных шлифовальных станков, обеспечивающей совпадение главного рабочего движения абразивного круга и вспомогательного движения подачи заготовки в одной плоскости. Это означает, что векторы скоростей круга и детали лежат в одной плоскости и, следовательно, кинематическая модель шлифования должна быть плоской.

Второе допущение означает пренебрежение исходной шероховатостью поверхности заготовки по сравнению с глубиной резания. Это допущение вызвано необходимостью учета глубины резания, отсчет которой ведется от поверхности детали. Поскольку уравнение поверхности детали неизвестно, то проще всего аппроксимировать ее прямой линией. Следовательно, модель является более точной, когда глубина резания много больше глубины исходной шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки. В большинстве случаев это условие соблюдается, в частности, при черновом шлифовании.

Общеизвестно, что траекторией движения зерна шлифовального круга является циклоида. Рассмотрим след от двух соседних абразивных зерен находящихся на одном радиусе и лежащих в одной радиальной плоскости (рис. 1).

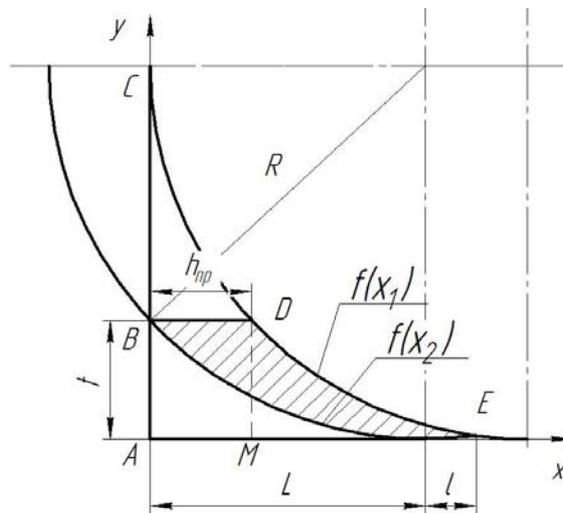


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению максимального объема стружки, срезаемой единичным зерном

Проекцию дуги контакта абразивного зерна с заготовкой на ось x находим по теореме Пифагора:

$$L = \sqrt{R^2 - (R - t)^2} = \sqrt{2Rt - t^2} \quad (1)$$

где R – радиус шлифовального круга;

t – глубина шлифования;

Половину расстояния между соседними абразивными зернами, находящимися на одном радиусе, лежащими в одной плоскости и движущимися по одной и той же траектории находим по формуле [8].

$$l = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{8168,3 \cdot h^{2,15} \cdot K_3^{0,667}}{d_3^2 \cdot 10^6}}} \quad (2)$$

где h – глубина рабочего слоя;

K_3 – объемная концентрация абразивных зерен;

d_3 – диаметр абразивного зерна.

Площадь среза единичным зерном равна:

$$S_{BDE} = S_{ACE} - S_{BCD} - S_{ABE}, \quad (3)$$

Учитывая, что:

$$S_{ACE} = \int_0^{L+l} f(x_1) dx, \quad (4)$$

$$S_{BCD} = \int_0^h f(x_1) dx + h_{np} \cdot t, \quad (5)$$

$$S_{ABE} = \int_0^{L+l} f(x_2) dx, \quad (6)$$

где h_{np} – продольное перемещение круга за 1 оборот, мм/об;

R – радиус шлифовального круга, мм;

t – глубина шлифования, мм.

Продольное перемещение круга рассчитывается:

$$h_{np} = \frac{2\pi R \cdot v_{np}}{v_K}, \quad (7)$$

где v_{np} – продольная подача шлифовального круга;

v_K – скорость вращения шлифовального круга.

Так как фигура образована пересечением двух окружностей, одна из которых является исходной, а другая задается со смещением по оси x , то данные окружности могут быть описаны следующими функциями:

$$f(x_1) = \sqrt{R^2 - (x - h_{np})^2}, \quad (8)$$

$$f(x_2) = \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (9)$$

Подставив данные функции в уравнения (4-6), и учитывая (1-2) получим:

$$S_{ACE} = \int_0^{\sqrt{2Rt-t^2} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{8168,3 \cdot h^{2,15} \cdot K_3^{0,667}}{d_3^2 \cdot 10^6}}}} \sqrt{R^2 - (x - h_{np})^2} dx, \quad (10)$$

$$S_{BCD} = \int_0^{h_{np}} \sqrt{R^2 - (x - h_{np})^2} dx + h_{np} \cdot t, \quad (11)$$

$$S_{ABE} = \int_0^{\sqrt{2Rt-t^2} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{8168,3 \cdot h^{2,15} \cdot K_3^{0,667}}{d_3^2 \cdot 10^6}}}} \sqrt{R^2 - x^2} dx, \quad (12)$$

Подставив (7, 10-12) в (3) и, проведя интегрирование и преобразования, имеем:

$$S_{BDE} = \int_0^{\sqrt{2Rt-t^2} + \frac{1}{2\sqrt{\frac{8168,3 \cdot h^{2,15} \cdot K_3^{0,667}}{d_3^2 \cdot 10^6}}}} \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{2\pi R \cdot v_{IP}}{v_K}\right)^2} dx - \int_0^{\frac{2\pi R \cdot v_{IP}}{v_K}} \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{2\pi R \cdot v_{IP}}{v_K}\right)^2} dx + \frac{2\pi R \cdot v_{IP}}{v_K} \cdot t - \int_0^{\sqrt{2Rt-t^2} + \frac{1}{2\sqrt{\frac{8168,3 \cdot h^{2,15} \cdot K_3^{0,667}}{d_3^2 \cdot 10^6}}}} \sqrt{R^2 - x^2} dx = \frac{v_{IP} (2Rt - t^2)}{10v_K} \quad (13)$$

Максимальный объем стружки, срезаемой единичным зерном равен:

$$V_c = S_{BDE} \cdot z, \quad (14)$$

где z – размер зерна шлифовального круга, мм.

Данная зависимость позволяет с достаточной точностью рассчитать объем снимаемой стружки единичным зерном.

Вследствие того, что процесс стружкообразования при шлифовании протекает под действием больших конечных пластических деформаций (локализуемых в узкой зоне пластического сдвига), в условиях высоких температур, больших скоростей деформирования и малой длительности во времени, состояние обрабатываемого металла приближается к идеально-пластическому. На основании этого факта принимаем, что вследствие такой деформации, срезаемая стружка приобретает шарообразную форму, так как в этом случае, при движении она будет обладать максимальной энергией и минимальным лобовым сопротивлением. [2]

Зная размеры стружки, принимая во внимание [1,2], пересчитываем их на размер шара того же объема:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d_{CT}^3}{6} \cdot K_{пол}, \quad (15)$$

где $K_{пол}$ – коэффициент полноты стружки. Для стали 45 принимается $K_{пол} = 1,1$ [2]

Тогда, учитывая (14) диаметр стружки шарообразной формы d_{CT} равен:

$$d_{CT} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot v_{IP} \cdot Z (2Rt - t^2)}{10\pi v_K \cdot K_{пол}}} \quad (16)$$

Полученная математическая модель позволяет с большой точностью рассчитать максимальные размеры стружки, срезаемой единичным зерном шлифовального круга, за счет чего определить максимальную дисперсность твердых частиц, формирующих поток шлама, образующийся в зоне резания при плоском шлифовании.

Так при шлифовании абразивным кругом *ПП 250×40×76 4A40СМ19К 35м/с А2 кл*, $R=125$ мм, $t=0,5$ мм, $V_{IP}=2$ м/мин, $V_K=35$ м/с, $z=40$ мкм, диаметр стружки шарообразной формы d_{CT} срезаемой единичным абразивным зерном составляет $0,1$ мм.

Математическая модель взаимодействия частиц шлама со шторой из СОЖ базируется на основных положениях гидродинамики [9,10].

При расчете использованы следующие допущения:

1. Штора СОЖ, вытекающая из сопла, неразрывна по всей длине, имеет одинаковую плотность и скорость потока;
2. Факел шлама представляет поток частиц с одинаковой скоростью, но направленных под различными углами к горизонтальной плоскости;
3. Движение частицы шлама в вертикальном потоке СОЖ равнозамедленное.

Рассмотрим движение частицы при попадании в движущийся поток СОЖ, толщина которого при уменьшении высоты h уменьшается (рис. 2), наименьшее торможение испытает частица шлама с углом падения $\alpha = \alpha_{min}$, т.е. $\alpha_{min} = 0^\circ$.

Так как движение частицы шлама в вертикальном потоке СОЖ равнозамедленное, поэтому:

$$S_{ш} = v_{СТ} \cdot t - \frac{at^2}{2} \quad (17)$$

где $v_{СТ}$ - скорость частицы шлама, м/с;

t – время, за которое скорость частицы $v_{СТ}$ уменьшится до скорости струи v_{min} ;

a – ускорение, м/с².

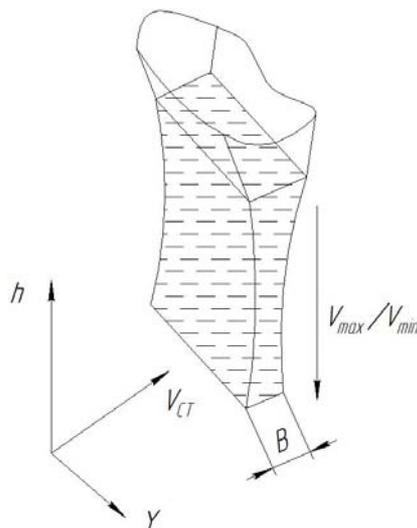


Рисунок 2 – Распределение скоростей движения частицы шлама

Ускорение частицы, в момент соприкосновения со шторой СОЖ, рассчитываем по второму закону Ньютона:

$$a = \frac{F_{тр.в.}}{m} \quad (18)$$

где m - масса частицы, кг;

$F_{тр.в.}$ – сила сопротивления воздуха, Н.

С другой стороны:

$$a = \frac{v_{к} - v_{СТ}}{t} \quad (19)$$

Время, за которое начальная скорость частицы, равная скорости круга $v_{к}$ уменьшится до скорости $v_{СТ}$, находится по формуле:

$$t = \frac{L}{v_{к}} \quad (20)$$

где L - расстояние от зоны обработки до шторы из СОЖ, м;

$$m = V_c \cdot \rho \quad (21)$$

где ρ - плотность частицы, кг/м³;

Учитывая (15):

$$m = \frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{СТ}^3}{6} \cdot K_{пол} \quad (22)$$

Сила сопротивления воздуха $F_{тр.в.}$ определяется зависимостью:

$$F_{тр.в.} = \frac{C_x \rho_e \pi d_{СТ}^2 v_{к}^2}{2} \quad (23)$$

где C_x – коэффициент сопротивления воздуха;

ρ_e – плотность воздуха, кг/м³;

Тогда:

$$v_{CT} = v_{\kappa} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{CT} \cdot K_{нол}} \right) \quad (24)$$

Время, за которое скорость частицы v_{CT} уменьшится до скорости струи v_{min} находится по формуле:

$$t = \frac{v_{CT} - v_{min}}{a} \quad (25)$$

По второму закону Ньютона:

$$a = \frac{F_{mp}}{m} \quad (26)$$

Сила сопротивления частицы в потоке СОЖ $F_{тр}$, в этом случае, определяется [10]:

$$F_{mp} = 3\pi\mu v_{CT} d_{CT} \left(1 + \frac{3 \cdot d_{CT} v_{CT}}{16\eta} \right) \quad (27)$$

где μ - динамическая вязкость жидкости, Па·с ;

η - кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

Тогда:

$$S_{\phi} = v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) \cdot \frac{v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) - v_{min}}{3\pi\mu \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) d_{\dot{N}\dot{O}} \left(1 + \frac{3 \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right)}{16\eta} \right) - \frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}}^3 \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}}{6}}$$

$$\frac{3\pi\mu \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) d_{\dot{N}\dot{O}} \left(1 + \frac{3 \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right)}{16\eta} \right)}{\frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}}^3 \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}}{6}} \cdot \frac{v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) - v_{min}}{3\pi\mu \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right) d_{\dot{N}\dot{O}} \left(1 + \frac{3 \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot v_{\dot{e}} \left(1 - \frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}} \right)}{16\eta} \right) - \frac{\pi \cdot \rho \cdot d_{\dot{N}\dot{O}}^3 \cdot \hat{E}_{\dot{i}\dot{i}\dot{e}}}{6}}{2}$$

Проведя преобразования, получаем:

$$S_{ui} = \frac{\rho \cdot d_{CT}^2 \cdot K_{нол} \cdot \left[v_{min} + v_{\kappa} \left(\frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{CT} \cdot K_{нол}} - 1 \right) \right]}{18\mu \left(\frac{3v_{\kappa} \cdot d_{CT} \left(\frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{CT} \cdot K_{нол}} - 1 \right)}{16\eta} \right)} \cdot \left(1 - \frac{v_{min} + v_{\kappa} \left(\frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{CT} \cdot K_{нол}} - 1 \right)}{2v_{\kappa} \left(\frac{3C_x \rho_a \cdot L}{\rho \cdot d_{CT} \cdot K_{нол}} - 1 \right)} \right) \quad (28)$$

Для эффективного улавливания факела отходов толщина заградительной шторы из СОЖ должна быть больше чем расстояние S_{ui} , которое преодолет частица шлама при взаимодействии со струей СОЖ, т.е:

$$B > S_{ui} \quad (29)$$

При следующих условиях: шлифование абразивным кругом *ПП 250×40×76 4A40CM19K 35м/с А2 кл.* стали 45 плотностью $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $t=0,5 \text{ мм}$, $V_{\text{ПР}}=2 \text{ м/мин}$, $z=40 \text{ мкм}$, расход жидкости, обеспечиваемый гидронасосом станка $Q=45 \text{ л/мин}$, динамическая вязкость эмульсии $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, кинематическая вязкость эмульсии $\eta = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, расстояние от зоны обработки до шторы из СОЖ $L=0,15 \text{ м}$, коэффициент сопротивления воздуха $C_x = 0,2$, плотность воздуха $\rho_g = 1,29 \text{ кг/м}^3$, расстояние, которое преодолит частица шлама $S_{\text{ш}} = 1,2 \text{ мм}$, поэтому оптимальной, для выбранных режимов шлифования, является толщина заградительной шторы из СОЖ 2мм. Данное значение обусловлено конструктивными соображениями, а также тем, что расход СОЖ не превысит мощности гидросистемы станка. [11]

Таким образом, получена математическая модель взаимодействия потока шлама со шторой из СОЖ, которая обеспечивает прогнозирование результатов такого взаимодействия и расчет эффективной толщины шторы СОЖ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко, Ю.В. Совершенствование техники применения СОЖ при плоском шлифовании на основе закономерностей ее поведения в рабочей зоне [Текст] / Ю.В. Василенко. - дис. канд. тех. наук., Орел, 2002 г.
2. Шумячер, В.М. Модель взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала при шлифовании. Схема стружкообразования [Текст] / В.М. Шумячер, А.В. Кадильников // Технология машиностроения. – 2007. – №4. – С. 18–21.
3. Маслов, Е.Н. Теория шлифование материалов [Текст] / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
4. Филимонов, Л.Н. Высокоскоростное шлифование [Текст] / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. – 248 с., ил.
5. Азарова, Н.В. Исследование параметров единичных срезов при плоском шлифовании с вибрациями [Текст] / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха / Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2005. – Вып. 17. – С. 49–55.
6. Реченко, Д.С. Исследование высокоскоростного шлифования. Современные проблемы машиностроения: Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. [Текст] / Д.С. Реченко, Е.С. Реченко, М.А. Вальтер/– Томск: Изд-во ТГТУ, 2008. – С. 518-521.
7. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования [Текст] / В. И. Островский./ – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
8. Бишутин, С.Г. Технологическое обеспечение требуемых значений совокупности параметров качества поверхностного слоя деталей при шлифовании с наибольшей производительностью [Текст] / С.Г. Бишутин. - Дис. д-ра техн. наук: 05.02.2008 Брянск, 2005 327 с. РГБ ОД, 71
9. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев / – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – 274 с.
10. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. - Т. 2. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц / – М.: Наука, 1988. – 733 с.
11. Тюхта, А.В. Практическое применение комбинаторного способа подачи СОЖ. Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии [Текст]: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012 г./под общ. ред. проф. А.М. Козлова. –Ч.2.-Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. –334 с. с.24–29.

Тюхта Антон Владимирович,

Преподаватель кафедры «Вычислительная техника и информационные технологии»

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

E-mail: swejk@rambler.ru

A.V. TYUKHTA

MATHEMATICAL MODEL OF SLUDGE PARTICLES WITH CURTAINS COOLANT IN FROM A PLANE GRINDING PERIPHERY OF THE CIRCLE

In this article considers the mathematical model of the interaction between the particles of sludge from the curtain of the coolant at the periphery of the flat grinding disc with a combinatorial method of coolant. The mathematical model allows us to more accurately calculate the maximum size of chips, cut a single grain of the grinding wheel, and provides a prediction of the results of this interaction and the calculation of the effective thickness of the liquid flow.

Keywords: surface grinding, the combinatorial method of coolant, coolant from the curtain.

BIBLIOGRAPHY

1. Vasilenko, Yu.V. Improved technique of coolant in the grinding of flat patterns, based on its behavior in the work area [Text] / Y. Vasilenko. - Dis. Candidate. those. Sciences., Oryol, 2002
2. Shumyacher, V.M. The model of interaction of abrasive grains and the material during grinding. Scheme chip [Text] / V.M. Shumyacher, A.V. Kadilnikov / Mechanical Engineering Technology. - 2007. - № 4. - pp. 18-21.
3. Maslov, E.N. Theory of grinding materials [Text] / E.N. Maslov. -Moscow: Mashinostroenie, 1974. 320 p.
4. Filimonov, L.N. High-speed grinding [Text] / L.N. Filimonov. - Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad. Department, 1979. - 248 p.
5. Azarova, N.V. Investigation of the parameters of individual slices in plane grinding with vibrations [Text] / N.V. Azarova, P.G. Matyukha / Instrument Reliability and optimization of systems: Sat researcher. works. - Kramatorsk Univ DSEA, 2005. - Vol. 17. - pp. 49-55.
6. Rechenko, D.S. The study of high-speed grinding. Modern Problems of Mechanical Engineering: Proc. VI International. scientific and engineering. conference. [Text] / D.S. Rechenko, E.S. Rechenko, M.A. Walter / - Tomsk Univ TSTU, 2008. - pp. 518-521.
7. Ostrovsky, V.I. Theoretical Foundations of the grinding process [Text] / V.I. Ostrovsky. / - L.: Leningrad Univ. Press, 1981. - 144 p.
8. Bishutin, S.G. Technological support required values of a set of quality parameters of the surface layer in grinding parts with the highest performance [Text] / S.G. Bishutin. - Dis. Dr technical. Science: 05/02/2008 Bryansk, 2005 327 p. RSL OD, 71
9. Altshul, A.D. Hydraulics and Aerodynamics [Text] / A.D. Altshul, P.G. Kiselev / - Moscow: Publishing House of Construction, 1965. - 274 p.
10. Landau, L.D. Theoretical Physics. - T. 2. Hydrodynamics [Text] / L.D. Landau, E.M. Livshits / - Moscow: Nauka, 1988. - 733 p.
11. Tyukhta, A.V. Practical application of combinatorial methods coolant. Fundamental and applied problems of modernization of modern engineering and metallurgy [Text]: a collection of scientific works of the international scientific conference dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Mechanical Engineering LGTU. 17-19 May 2012 / under total. Ed. Professor. AM Kozlov. -CH.2.-Lipetsk Univ LGTU, 2012. -334 p., pp.24-29.

Tyukhta Anton Vladimirovich

Lecturer of the Department "Computer Science and Information Technology"
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
E-mail: swejk@rambler.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 004.925.84

А.А. ЕРЁМИН

КОНСТРУКТИВНАЯ СЛОЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

Поставлена задача оценки конструктивной сложности машиностроительных деталей. Предложены оригинальные методики по расчёту этого показателя с использованием расширенной электронной модели детали. Представлены примеры расчёта конструктивной сложности. Приведены результаты апробации математических моделей и сделаны выводы об их адекватности.

Ключевые слова: электронная модель детали, сложность детали, сложность конструкции, технологичность изделия, трудоёмкость изготовления детали, конструктивная сложность, анализ трёхмерной модели, расширенная модель детали.

В ходе выполнения процедур конструкторско-технологической подготовки производства неоднократно возникает необходимость оперативной оценки конструктивной сложности (КС) проектируемого изделия. Такая оценка необходима для:

- 1) определения себестоимости процесса разработки;
- 2) учёта трудозатрат конструкторов;
- 3) выявления уровня технологичности деталей;
- 4) сравнительного анализа конструкций для оценки их себестоимости;
- 5) решения разнообразных задач планирования и распределения ресурсов;
- 6) оценки сроков подготовки производства.

Особенную важность данная оценка имеет в мелкосерийном и единичном производстве, при котором конструкции изделий сильно отличаются друг от друга.

Показатель конструктивной сложности должен удовлетворять следующие требования:

- 1) Универсальность, т.е. возможность применить данный метод оценки к любым типам и видам изделий, входящим в них деталям.
- 2) Объективность, т.е. численное значение показателя должно определяться через свойства самой детали.
- 3) Достоверность, т.е. показатель КС в действительности должен отражать сложность изделия. При этом сложность впоследствии может быть «спроецирована» на трудоёмкость изготовления этого изделия, т.е. деталь с более высоким показателем КС будет иметь более высокую трудоёмкость изготовления.

Суть метода оценки конструктивной сложности изделия заключается в рекурсивной иерархической декомпозиции детали или сборочной единицы на отдельные элементы, называемые конструктивными элементами (КЭ). Если требуется оценить сложность сборки деталей, то сначала делается выделение каждой из входящих в неё деталей, затем определяется КС этих деталей, и, наконец, определяется КС всей сборки в зависимости от способа сопряжения в ней деталей.

Процесс оценки делится на 4 этапа. В результате декомпозиции детали образуется множество элементов, из которых состоит деталь. После этого выполняется определение параметров этих элементов – считывание их из модели и уточнение/дополнение данных у пользователя при необходимости. Выходной информацией являются параметры и атрибуты каждого из конструктивных элементов детали. По этим данным в соответствии с методикой выполняется расчёт сложности каждого из элементов. На последнем этапе по полученным значениям выводится общий показатель сложности всего изделия.

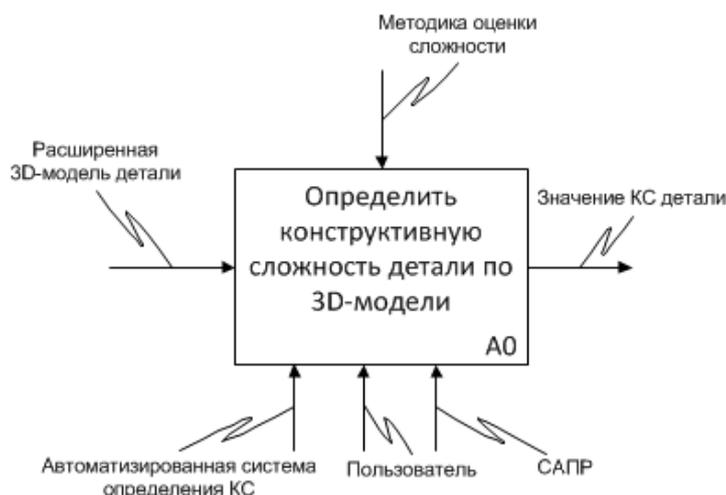


Рисунок 1 – Функциональное описание процесса определения КС

Постановка задачи. В данной работе решается задача проведения количественной оценки конструктивной сложности машиностроительной детали. Оценка выполняется путём анализа трёхмерной модели детали без привлечения статистической информации по аналогичным деталям.

Методы решения задачи. Оценка сложности может быть выполнена двумя методами: пооперационным и поэлементным. Для выполнения пооперационного анализа требуется информация о ходе построения модели, т.е. дерево построения, содержащее формообразующие операции и вспомогательные элементы (эскизы, дополнительная геометрия). Поэлементный анализ оперирует элементами модели. В наиболее распространённой форме представления трёхмерных моделей – поверхностной – элементами являются отдельные поверхности, т.е. грани тела. Сложность операции или сложность поверхности вычисляется по специальным формулам, включающим коэффициенты параметров геометрии и коэффициенты дополнительной информации, такой как технологические обозначения (шероховатости, допуски). Сложность всей детали рассчитывается либо как простая алгебраическая сумма сложностей всех составляющих, либо как среднее значение этих сложностей.

Оценка конструктивной сложности поэлементным методом. При данном подходе для оценки конструктивной сложности деталь рассматривается как множество поверхностей (граней), каждая из которых характеризуется степенью кривизны (нулевая кривизна – плоскость, одинарная, двойная), количеством смежных поверхностей, наличием допусков и требуемой шероховатости. Для определения сложности отдельной поверхности вводится оценочная функция от вышеуказанных параметров. Сложность всей детали при этом выражается приведённой суммой сложностей составляющих её конструктивных элементов. Изменение степени влияния тех или иных параметров граней тела на сложность достигается за счёт введения коэффициентов и показателей степеней.

Данный метод более прост в реализации, чем пооперационный, т.к. применяется обобщённый способ анализа электронной модели, однако полученное значение в большей степени отражает геометрическую сложность итоговой конструкции, чем конструктивную сложность детали с точки зрения трудоёмкости её изготовления и конструкторских затрат при разработке.

Пример расчёта конструктивной сложности поэлементным методом. Рассмотрим оценку конструктивной сложности поэлементным методом на примере втулки, модель которой представлена на рисунке 2.

Модель содержит три плоские поверхности и три поверхности одинарной кривизны. На наружную поверхность цилиндра проставлена шероховатость, на внутренний диаметр – качество точности Н14 (на 3D-виде не отображается), на плоские торцы втулки – допуск параллельности. Результаты расчёта представлены в таблице 1.

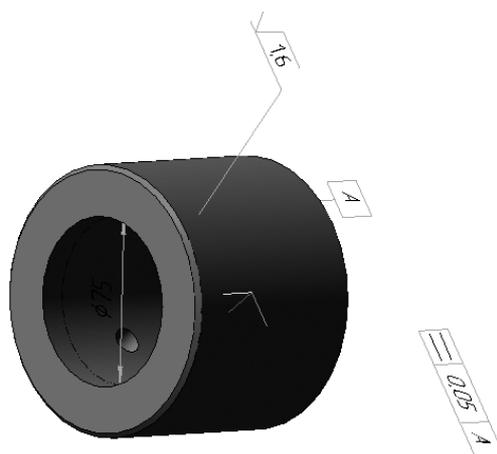


Рисунок 2 – 3D-модель детали «Втулка», выполненная в Компас-3D с соблюдением требований ГОСТ 2.052-2006

Таблица 1 – Расчёт конструктивной сложности

Поверхность	Кривизна	Число сопряжённых поверхностей	Шероховатость	Разм. допуск	Геом. допуск	Сложность
Наружная цилиндрическая	1	3	1.2	0	0	12.2
Внутренняя цилиндрическая	1	3	0	1	0	12
Внутренняя поверхность отверстия	1	2	0	0	0	6
Торец	0	2	0	0	0	5
Торец	0	2	0	0	1	6
Фаска	0	2	0	0	0	5

Итоговая конструктивная сложность детали равна 7.7.

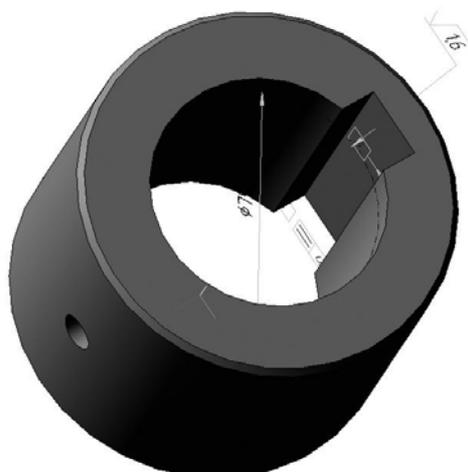


Рисунок 3 – Втулка со шпоночным пазом

Для сравнения добавим к модели элемент «шпоночный паз» на внутренней стороне цилиндра с допуском на параллельность его сторон (рис. 3).

В модели детали появляются три новые плоские поверхности, и соответствующим образом изменяется сложность всей детали (табл. 2).

Таблица 2 – Расчёт конструктивной сложности изменённой детали

Поверхность	Кривизна	Число сопряж. поверхностей	Шероховатость	Разм. допуск	Геом. допуск	Сложность
Наружная цилиндрическая	1	3	1.2	0	0	12.2
Внутренняя цилиндрическая	1	3	0	1	0	12
Внутренняя поверхность отверстия	1	2	0	0	0	6
Торец	0	2	0	0	0	5
Торец	0	2	0	0	1	6
Фаска	0	2	0	0	0	5
Боковая поверхность паза	0	4	0	0	0	17
Боковая поверхность паза	0	4	0	0	1	18
Паз	0	4	0	1	0	18

Расчётная сложность будет равна 11.

Методика оценки конструктивной сложности путём анализа дерева построения.

Модель любой детали представляется в виде множества конструктивных элементов, которые и необходимо проанализировать для расчёта показателя сложности. При пооперационном подходе каждый конструктивный элемент образуется в результате применения одной из формообразующих операций к некоторому эскизу. Для оценки сложности очередного элемента необходимо предварительно определить сложность образующего его эскиза и сложность применённой операции. Данные действия прделываются для всех конструктивных элементов, информация о которых берётся из самой модели, а точнее из дерева её построения, которое включает:

- 1) операции (выдавливание, вращение, кинематическая операция, фаска и т.д.);
- 2) эскизы;
- 3) вспомогательную геометрию (системы координат, плоскости и т.д.).

Анализ дерева необходимо выполнять сверху-вниз, именно в том порядке, в котором операции были использованы для создания геометрии детали. Из расчёта исключается вспомогательная геометрия, а также элементы дерева, отключённые самим пользователем. Среди эскизов анализу подлежат лишь те, которые непосредственно используются для формирования конструктивных элементов, т.е. те, на которые есть указатели в параметрах операций. Оценку сложности эскизов целесообразно выполнять унифицированной процедурой, в отличие от сложности операций, где параметры играют важную роль: какие-то влияют на сложность как весовые коэффициенты, а какие-то могут и полностью изменить расчётную формулу.

Математическая модель оценки сложности 2D-эскиза.

Так как большинство формообразующих операций (в т. ч. базовых) выполняются на основе эскизов, содержащих основную геометрию конструктивных элементов, отдельно встаёт необходимость оценки сложности двухмерных эскизов.

Наиболее правильно оценивать сложность эскиза, анализируя геометрические элементы, из которых он состоит. Таким образом, первым шагом является декомпозиция эскиза, в результате которой образуется множество элементов. Для каждого типа элементов можно задать определённое значение сложности в зависимости от геометрической сложности элемента. Тогда общая сложность эскиза будет равна сумме сложностей составляющих его элементов:

$$C_{\text{ýñê}} = \sum_{i=1}^N C_i$$

где N – общее количество элементов в эскизе,

C_i – сложность i -го элемента.

При оценке сложности размеры элементов не учитываются – в расчёт берутся лишь типы элементов, их количество, и в некоторых случаях параметры.

Для оценки сложности эскиза, включающего любую возможную геометрию, целесообразно задать множество базовых элементов и сопоставить им значения сложности. Тогда любые более сложные элементы опишутся как набор базовых элементов, и их сложность сможет быть вычислена аналогично – как сумма сложностей составных частей.

Самым простым геометрическим элементом является точка, однако в эскизах она не играет самостоятельной роли и обычно служит лишь опорой для промежуточных построений. При оценке сложности эскиза входящие в него точки не учитываются.

Следующим по сложности элементом является отрезок прямой. Так как он не имеет настраиваемых параметров, можно считать его самой простой частью эскиза и задать сложность, равную 1.

Вторым по значимости элементом является дуга окружности. Отрезки и дуги – наиболее часто используемые в эскизах геометрические элементы. Отсутствие явной связи между этими типами служит толчком к определению сложности дуги как независимой константы. С учётом порядка уравнения, которым описывается дуга (прямая линия описывается линейным уравнением, т.е. уравнением первого порядка, и её сложность мы определили как 1), логично считать сложность дуги равной 2.

С помощью отрезков и дуг окружностей можно создать геометрические контуры любой сложности, поэтому именно эти два типа элементов следует считать базовыми. Их сложности заданы явно – 1 и 2. Сложность других элементов будет выражаться через сложности базовых.

Используя отрезки и дуги, можно построить линию любой формы. Исходя из этого, для определения сложности порождённых элементов необходимо определить степень их похожести на базовые элементы и ввести соответствующие коэффициенты. В случае, если порождённый элемент состоит сразу из нескольких базовых, требуется предварительная декомпозиция.

Пример оценки сложности эскиза. В качестве примера оценки сложности рассмотрим следующий эскиз, содержащий типовые элементы (рис. 4). Результаты оценки приведены в таблице.

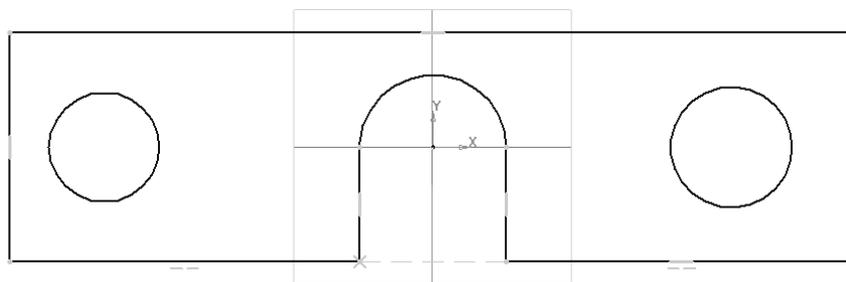


Рисунок 4 – Пример эскиза

Таблица 3 – Расчёт сложности эскиза

Тип элемента	Количество	Сложность	Итог
Отрезок	7	1	7
Окружность	2	4	8
Дуга окружности	1	2	2
			17

Итоговая сложность эскиза равна 17.

Математическая модель оценки сложности формообразующих операций. Под формообразующей операцией понимается некое геометрическое преобразование, приводящее к созданию конструктивного элемента, т.е. образованию формы изделия. Многие операции имеют ряд изменяемых параметров, которые, так или иначе, влияют на результат.

Большинство формообразующих операций, используемых при трёхмерном моделировании деталей, являются типовыми и присутствуют практически во всех САПР. Параметры этих операций тоже общеприняты и достаточно известны.

Почти все операции требуют наличия вспомогательных элементов, в соответствии с которыми образуется конструктивный элемент. Этими элементами обычно являются эскизы, которые представляют собой двухмерные чертежи.

Применение операции над эскизом с учётом заданных параметров и даёт конструктивный элемент. Результатом последовательного выполнения нескольких операций является готовая модель детали.

Для корректной оценки конструктивной сложности элемента детали недостаточно одной лишь величины сложности эскиза, лежащего в его основе. Каждая из операций имеет свою степень сложности, которая характеризует относительную сложность операций между собой и степень её влияния на сложность элемента в целом. В одних случаях сложность операции может быть выражена как коэффициент сложности эскиза (≥ 1), в других – как некая расчётная формула, включающая не только сложность положенного в основу эскиза, но и параметры самой операции. Обобщённо можно сказать, что:

$$C_{КЭ} = f(C_{опер}, C_{эск})$$

Т.е. сложность конструктивного элемента представляет собой функциональную зависимость от сложности операции и сложности образующего эскиза.

Сложность самой операции при этом тоже является некой функцией от типа операции и её параметров:

$$C_{опер} = \varphi(\text{тип операции, параметры})$$

Общая конструктивная сложность детали определяется как сумма сложностей всех конструктивных элементов, которыми она образована. Под конструктивными элементами понимается геометрия, полученная одной из формообразующих операций.

$$C = \sum_{i=1}^n C_{КЭ,i}$$

Конструктивная сложность, рассчитанная пооперационным методом, по своему смыслу наиболее близка к технологической трудоёмкости.

Пример оценки сложности конструктивного элемента. В качестве примера возьмём тело, полученное выдавливанием эскиза, рассмотренного выше, на расстояние 10 мм с уклоном внутрь под углом 10° (рис. 5).

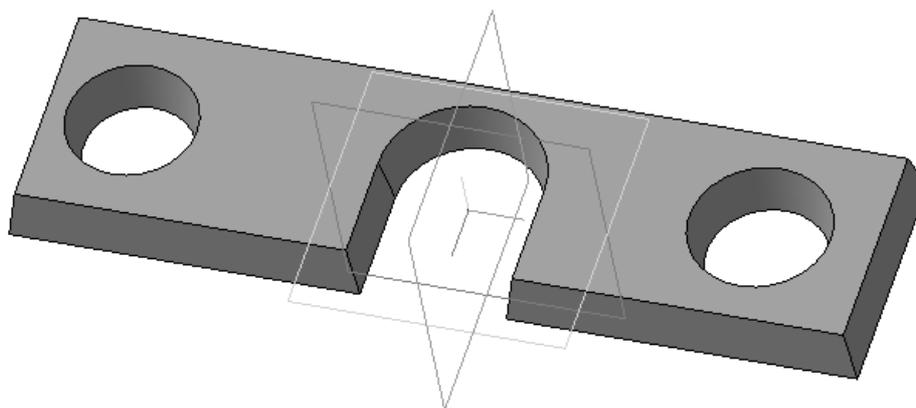


Рисунок 5 – Пример операции выдавливания

Обобщённая сложность операции выдавливания определяется формулой:

$$C_{\text{выд}} = C_{\text{выд.пр}} + C_{\text{выд.обр}}$$

Так как в данном случае выполняется выдавливание лишь в одну сторону, $C_{\text{выд.обр.}} = 0$.

Конкретная формула имеет вид:

$$C_{\text{выд.пр}} = C_{\text{эск}} \cdot k_{\text{укл}} \cdot k_{\text{ТС}}$$

Сложность эскиза получена ранее – она равна 17. Коэффициенты принимают следующие значения:

- 1) $k_{\text{укл}} = 1.3$, т.к. делается уклон внутрь;
- 2) $k_{\text{ТС}} = 1$, т.к. тонкая стенка тела не создаётся.

Итак, сложность конструктивного элемента равна:

$$C_{\text{КЭ}} = 17 \cdot 1.3 \cdot 1 = 22.1$$

Практическая реализация. Наиболее удобным видом системы автоматизированной оценки конструктивной сложности деталей по расширенным 3D-моделям является расчётная библиотека. Модули для САПР Компас-3D разрабатываются как классические DLL-библиотеки, но с определённым набором служебных функций и процедур. При запуске библиотеки выполняется подключение к программе по технологии COM и открывается окно библиотеки, содержащее параметры и отображающее результаты оценки.

Компас-API позволяет работать и с деревом построения модели, и с каждой гранью в отдельности, что позволяет реализовать оба подхода, поэтому библиотека выполняет оценку конструктивной сложности двумя описанными методами: пооперационным и поэлементным. Анализируется деталь, открытая в данный момент. В процессе анализа формируется лог работы с подробной информацией о каждом элементе, в т. ч. с промежуточной и итоговой сложностью. Создан визуальный индикатор прогресса анализа.

Апробация модели. Для проверки адекватности разработанной математической модели и тестирования соответствующей программной библиотеки для САПР Компас-3D была произведена выборка нескольких десятков деталей с тульского завода «Щегловский вал». Критерием отбора деталей служила их разноплановость, т. к. разработанная методика направлена именно на независимую оценку конструктивной сложности, т. е. когда не рассматриваются аналогичные по конструкции детали.

Среди множества изделий были выбраны: плита переходная, корпуса, основание, панель, панель разъемов, плита, ребро корпуса аппаратуры, консоль, кожух, кронштейны, несколько видов рам, кольцо, крышка, скобы, подставка, стенки, радиатор и некоторые другие. Для каждого изделия были взяты данные за плановый период (месяц): трудоёмкость на план и количество деталей на план. Таким образом, были известны трудоёмкости всех деталей, полученные на реальном производстве.

Для проведения испытаний были взяты имеющиеся на заводе трёхмерные модели выбранных деталей. Модели были предварительно проверены и дополнены конструкторско-технологической информацией в соответствии с рабочими чертежами. Далее была произведена автоматизированная оценка конструктивной сложности этих моделей с помощью разработанной программной библиотеки.

По результатам испытаний и математической обработки полученных данных была выявлена корреляционная зависимость между показателем конструктивной сложности и трудоёмкостью изготовления детали с коэффициентом 0.51 при оценке поэлементным и 0.68 при оценке пооперационным методом. Полученные результаты показывают, что разработанные математические модели являются адекватными и применимы к использованию, однако требуют некоторой корректировки и доработки. Для более точного определения направления корректировки планируется провести ещё несколько аналогичных экспериментов с другими наборами деталей, т.к. в процессе анализа информации об имеющихся деталях было замечено, что имеется неоднородность в способе их изготовления. Так, часть деталей производится на оборудовании с ЧПУ, а часть на стандартном оборудовании, что неизбежно влияет на величину заявленной трудоёмкости.

Заключение. Разработанные методики позволяют оценить конструктивную сложность детали по расширенной трёхмерной модели без необходимости иметь информацию по аналогичным с точки зрения конструкции деталям, что и является одним из основных достоинств этих методик. В результате проверки методик на данных, взятых с производства, были получены приемлемые результаты и показана состоятельность математических моделей. Следующим шагом является проведение дополнительных испытаний, выявление проблемных мест, а также последующая корректировка и уточнение моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимов, М. Р. Разработка автоматизированной подсистемы управления многономенклатурным производством на основе теории конструктивно-технологической сложности [Текст] / М. Р. Галимов : Дис. ... канд.техн.наук – Ижевск: ИжГТУ, 2005. – 143 с.
2. Новикова, М. В. Оценка уровня технологичности машиностроительной детали на ранних этапах под-готовки производства [Текст] / М.В. Новикова : Дис. ... канд.техн.наук – Тула: ТулГУ, 2006. – 127 с.
3. Фоминых, Р. Л. Организация эффективных производственных систем методами теории сложности [Электронный ресурс] / Р. Л. Фоминых / Режим доступа: http://science-bsea.bgita.ru/2010/ekonom_2010/fominych_organiz.htm. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2005.
4. ГОСТ 2.052-2006 ЕСКД «Электронная модель изделия» и 2.053-2006 «Электронная структура изделия» [Текст].

Ерёмин Андрей Андреевич

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Кафедра «Автоматизированные станочные системы»
Магистрант
Тел: 8-920-742-50-22
Email: andrey.yeriomina@gmail.com

A.A. YERIOMIN

DESIGN COMPLEXITY OF PARTS AND ITS APPLICATIONS

This article is about how to estimate constructive complexity of the machinery parts. New original methods are proposed. The source information used in complexity estimation process is extended three-dimensional model of the part. Few examples of constructive complexity estimation are shown in the article. The results of models approbation are given.

Keywords: computer part model, machinery part complexity, construction complexity, machinery part manufacturability, constructive complexity, 3D model analyzing, extended part model.

BIBLIOGRAPHY

1. M.P. Galimov, Development of automated subsystem for multiproduct production based on theory of constructively-technologically complexity, IzhSTU, 2005.
2. M.V. Novikova, Estimation of Engineering Part Manufacturability Level at Preproduction Early Stages, TulSU, 2006.
3. R.L. Fominykh, Effective Manufacturing Systems Organization by Methods of Complexity Theory, IzhSTU, 2005.
4. Standards GOST 2.052-2006 ECKD “Electronic Model of Product” and 2.053-2006 “Electronic Structure of Product”.

Yeriomina Andrey Andreevich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Undergraduate
Phone: 8-920-742-50-22
Email: andrey.yeriomina@gmail.com

С.В. КИСЕЛЕВА, А.Д. ГЛУШКОВА

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА 3D ПРИНТЕРЕ

На основе существующего технологического оборудования были рассмотрены основные принципы его работы, а также разработаны 3D модели деталей, чертежи и получены реальные прототипы с последующей их сборкой и проведением испытаний.

Ключевые слова: прототип, 3D принтер.

Постановка задачи исследования

Предметом научной работы было изучение возможностей получения прототипов деталей сложной формы посредством специального оборудования – 3D принтера, а также рассмотрение принципов его работы.

Разработка новой продукции предполагает создание прототипов будущих изделий. Их получение традиционными методами, такими как механообработка, литье, потребует нескольких недель и даже месяцев и является сложным, длительным и дорогостоящим этапом проектирования.

3D принтер – специальное оборудование для создания прототипов деталей, позволяющее получить прототипы новых изделий максимально просто, причем, процесс создания прототипа, в том числе полностью функционального макета, занимает несколько часов или дней, вне зависимости от сложности геометрии изделия.

В связи с этим были поставлены следующие цели:

- Изучить возможности использования 3D принтеров.
- Выявить преимущества использования систем быстрого прототипирования в сравнении с традиционными методами.
- Создать 3D прототип для изготовления детали.

Сформулированы задачи:

1. Изучить принципы работы систем быстрого прототипирования
2. Рассмотреть совместимость с различными программами трехмерного моделирования.
3. Ознакомиться с программой, посредством которой производится непосредственное управление процессом прототипирования.
4. Провести сравнительный анализ производства новой продукции до и после внедрения на предприятии 3D принтера.

Первые RP-системы (RP – rapid prototyping, быстрое прототипирование) были разработаны в начале 90-х годов прошлого века в США. Назначение этих установок, как следует из названия – быстрое изготовление прототипов. В отличие от традиционных технологий, таких как механообработка или литье, все RP-системы представляют собой установки для послойного синтеза моделей (выращивания).

Все имеющиеся системы для быстрого прототипирования работают по схожему - послойному принципу построения физической модели, который заключается в реализации трех этапов:

- считывание трёхмерной геометрической информации из CAD-систем в формате STL. Все CAD-системы твёрдотельного моделирования способны транслировать файлы в формате STL;
- разбиение трёхмерной цифровой модели на поперечные сечения (слои) с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием;
- построение сечений детали слой за слоем снизу вверх до тех пор, пока не будет получен физический прототип цифровой модели.

3-D Принтер EDEN 500V - 3-D принтер (рис. 1), печатающий трехмерные модели, построенные в различных программах трехмерного моделирования: SolidWorks, Pro-E, unigraphics и autoCad и экспортированные в STL формат.



Рисунок 1 – Общий вид 3D Принтера

Основные технические характеристики:

- Толщина слоя (разрешение по оси Z) до 16 микрон;
- Максимальный размер модели (X×Y×Z): 490×390×200 мм;
- Точность 0.1–0.3 мм средняя (точность зависит от геометрии и размеров модели);
- Модельный материал: FullCure® 720 — полупрозрачный материал; VeroWhite™ — белый фотополимер; VeroBlue™ — синий фотополимер; VeroBlack™ — чёрный фотополимер; TangoBlack™ — чёрный резиноподобный фотополимер; TangoGray™ — серый резиноподобный фотополимер; Материал поддержки FullCure® 705 — безопасный материал поддержки, легко удаляется горячей водой в моюющей станции;

- Формат файлов на входе: STL и SLC;
- Совместимость WindowsXP, Windows 2000.

На ОАО «ГМС Насосы» прототипирование применяется для:

- испытания рабочих колес на соответствие конструкторским параметрам;
- создания и обеспечения модельного цеха элементами модельной оснастки;
- проверки на собираемость корпусных изделий и оснастки.
- выращивание элементов стержневой оснастки для изготовления лопаток центробежных колес.

То есть прототипы ОБЪЕТ могут использоваться не только для визуализации будущего изделия, но также проверки собираемости изделия и даже для проведения функциональных тестов.

В производстве 3-D принтеры используются по следующим причинам:

1. Стоимость времени
2. Стоимость ошибки разработчика
3. Стоимость творческого подхода
4. Стоимость конфиденциальности

Окупаемость принтеров 3D объясняется следующим: во-первых, стоимость принтеров гораздо меньше, чем финансовые потери, связанные с задержкой выпуска новой продукции на рынок. Во-вторых, цена даже самого дорогого 3D принтера несопоставима с затратами на исправление ошибок в конструкции, обнаруженных на этапе производства.

Программа, в которой ведется прототипирование, ObjetStudio - приложение под ОС Windows, выполняет множество различных задач, основными из которых являются:

- Вставка объектов в область построения (виртуальный лоток для моделей);

- Расположение объектов по области построения;
- Установка параметров построения;
- Сохранение работы в файл OTF (ObjetTrayFormat);
- Отправка задания на печать.

Для выбора файла модели и помещения его на поле построения необходимо выполнить одно из следующих действий:

- переместить курсор на поле и кликнуть правой кнопкой мыши
- в главном меню программы выбрать команду Объект>Вставить (Object>insert)
- нажать на иконку Вставить модель (insertModel)

Откроется диалог вставки объекта. В открывшемся окне пользователь должен выбрать тип файла STL или SLC в строке Тип файла (Files of Types).

Несмотря на то, что решение о том – в каком месте и как расположить объект на поле построения принимается исходя из множества факторов, не существует строго определенных правил. В каждом случае надо решать индивидуально. Следует придерживаться следующего:

1. Правило XYZ

Необходимо располагать модель так, чтобы в лотке принтера она оказалась:

- Длинной стороной по оси X.
- Средней стороной по оси Y.
- Короткой стороной по оси Z.

2. Правило отверстий

Печатая объекты с отверстиями, выемками и открытыми пустотами важно ориентировать их отверстиями вверх, чтобы принтер не заполнял пустоты материалом поддержки.

3. Правило точной поверхности

Печатая модель с мелкими деталями на внешней поверхности, следует располагать мелкие детали лицом вверх. Это означает, что наиболее важная поверхность будет напечатана без поддержки, что гарантирует максимальную гладкость этой поверхности.

4. Правило слева направо.

Принтер двигает головку по оси X слева, от начала координат, направо. Если модель имеет разную высоту, то следует расположить ее так, чтобы высшая часть была ближе к началу координат. Это поможет избежать холостых ходов головки при печати высоких частей.

5. Правило минимизации поддержки

Для объектов типа цилиндров или трубок, оптимальное решение – располагать их стоя.

При проектировании и постановке на производство новой продукции на предприятии, необходимо выполнить следующие этапы:

1. Разработка рабочего проекта на насос с проведением расчетов его гидравлических параметров и расчета на прочность.

2. Изготовление макетного образца с использованием необходимой технологической оснастки для изготовления литых деталей сложной формы, которая в свою очередь подлежит разработке и изготовлению на инструментальном производстве.

3. После получения, заготовка передается на механический участок, где проходит обработку согласно требованиям конструкторской документации (КД).

4. Сборка насоса, проведение испытаний и корректировка КД, следовательно и технологической оснастки при необеспечении требуемых параметров.

В этом случае требуется переделывать часть оснастки, что обуславливает дополнительные затраты. Этапы повторяются на стадии изготовления опытного образца до тех пор пока спроектированный насос не выйдет на требуемые параметры.

При внедрении технологии 3D прототипирования, сразу после этапа конструирования насоса, на 3D принтере выращиваются детали насоса на макетный образец, где не требуется затрат на изготовление технологической оснастки, и время получения макетной детали снижается до 1-2 дней. Ранее этот промежуток времени, в зависимости от сложности детали включал в себя 4-5 месяцев.

При испытании макета насоса производится оценка соответствия результатов испытания запроектированным данным, корректировка 3D модели в специализированной программе (SolidWorks) с последующим выращиванием прототипа. Только при получении положительных результатов, планируется этап изготовления серийной оснастки.

Следовательно, при внедрении метода прототипирования сокращается время на разработку новой продукции и существенно экономятся затраты на технологический процесс.

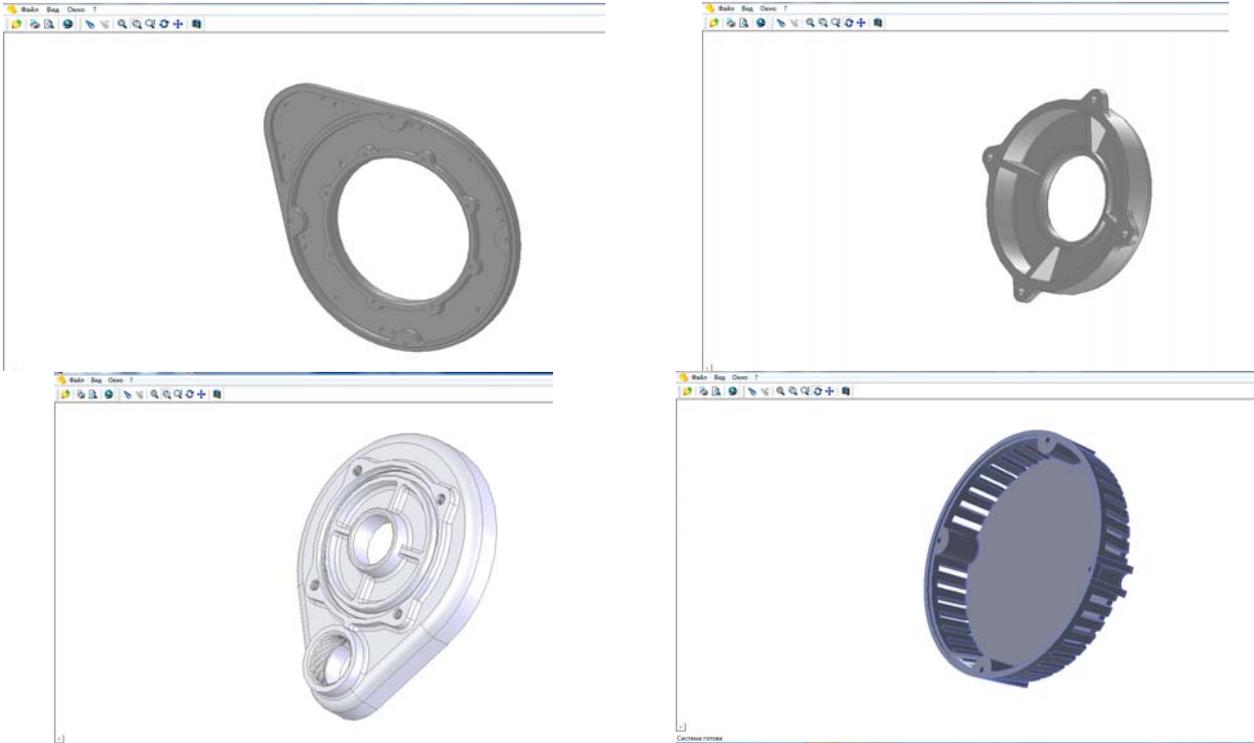


Рисунок 2 – 3D модели деталей

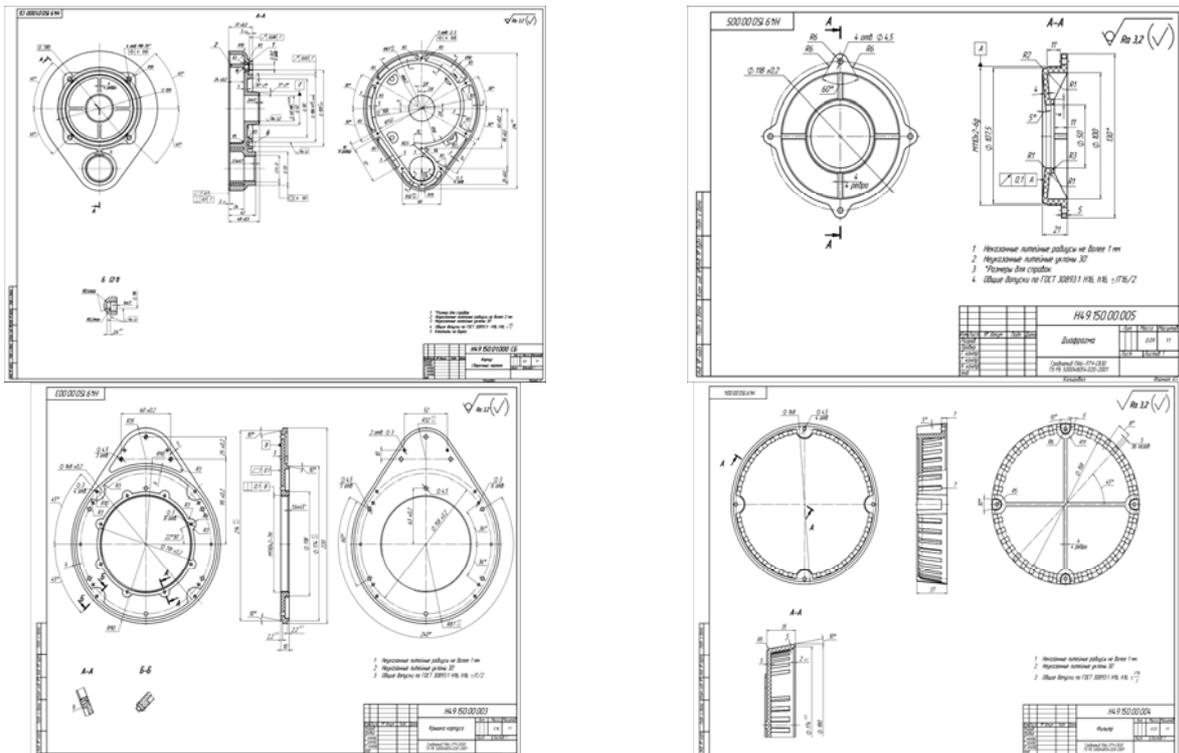


Рисунок 3 – Чертежи деталей

Конструирование, расчеты, материалы

На заводе ОАО «ГМС Насосы» были проведены следующие этапы по прототипированию модели электронасоса Гном:

- 1) Созданы 3D модели деталей в соответствующей программе (SolidWorks) (рис. 2);
- 2) Разработаны чертежи конструкции деталей, входящих в изделие (рис. 3);
- 3) Посредством 3D принтера получены прототипы моделей деталей (рис. 4);
- 4) Произведена сборка полученных прототипов в единую модель для последующего проведения испытаний (рис. 5).



Рисунок 4 – Прототипы деталей



Рисунок 5 – Сборка насоса и проведение испытаний

Выводы по проделанной работе:

Непрерывное усложнение конструкций машин, рост требований к их эксплуатационному качеству, обострение конкуренции на рынке машиностроительной продукции вызывают необходимость во внедрении на производство новых технологий и современного оборудования, которые позволят сократить сроки проектирования и создания новых изделий, увеличив производительность процесса. Для того, чтобы стать компетентным специалистом, необходимо еще в процессе обучения изучать возможности нового оборудования и его технические и технологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство пользователя Eden500V Система трехмерной печати Objet Geometries, Ltd © 2005
2. 28 ТНП.00.000 РЭ Руководство по эксплуатации Электронасосы центробежные погружные типа Гном ОАО «Ливгидромаш» [Текст] – г. Ливны

Киселева Светлана Валентиновна

Ливенкий филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Ливны
Старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»
Тел: (46877) 71811
E-mail: kiselev_sergey60@mail.ru

Глушкова Анастасия Дмитриевна

Ливенкий филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Ливны
Студент
Факультет «Технология машиностроения и автоматизации производства»
E-mail: nastya_glushkova@bk.ru

S.V. KISELYOVA, A.D. GLUSHKOVA

PRODUCTION OF PROTOTYPES OF COMPLICATED SHAPE PARTS ON 3D PRINTER

On the basis of the existing technological equipment were reviewed by the main principles of its work, as well as developed 3D model of parts, drawings and received real prototypes with the follow-up their assembling and testing.

Keywords: 3D printer, RP- systems, ObjetStudio, OJSC «HMS Pumps», Electrical pump Gnom

BIBLIOGRAPHY

1. User's guide for Eden500V 3D Printing System Object Geometries, Ltd © 2005
2. 28 ТНП.00.000 РЕ Operating Manual, Electric Rotary Immersed Pumps Type Gnom "Livhydromach" Co., Livny

Kiselyova Svetlana Valentinovna

Senior Lecturer of the Dep. "Mechanical Engineering"
Livny Branch of the FSBEI HVT «State University – ESPC», Livny

Glushkova Anastasiya Dmitrievna

Livny Branch of FSBEI HVT «State University – ESPC», Livny
Student of the Faculty "Mechanical Engineering and Production Automation"

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.9.02-229

Н.Е. АВЕРКИНА

ОБЗОР МЕТОДОВ ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

В статье изложены вопросы, связанные с правкой дисковых алмазных кругов на металлической связке при обработке лейкосапфира. Рассмотрены основные виды правки, а также приведена схема установки для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке. Выполнен анализ основных проблем, возникающих при правке кругов.

Ключевые слова: лейкосапфир; дисковые алмазные круги на металлической связке; правка абразивным бруском; шлифование твердыми абразивными кругами; правка свободным абразивом; электроэрозионная правка; электрохимическая правка.

В настоящее время в машино- и приборостроении в качестве конструкционных материалов все более широко применяют неметаллические материалы (керамика, ферриты, ситаллы, кварц, стекло и др.), обработка которых сопряжена с процессом хрупкого разрушения. Особенностью этих материалов является высокая твердость.

Одним из таких материалов является лейкосапфир (монокристаллический оксид алюминия), который используется в таких отраслях современной науки и техники, как оптика, оптоэлектроника, микроэлектроника, нефте- и газодобыча, сувенирная продукция и ювелирная промышленность, атомная энергетика и медицина. Благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств сапфира, которые сохраняются до температуры 1950°C, он часто является единственным материалом, пригодным для использования в различных областях науки и техники. Изделия из лейкосапфира используются в качестве высокотемпературной изоляции, чехлов термодар, изоляторов газоразрядных ламп, элементов световодов и пр., они характеризуются отсутствием газовой выделением, высокой коррозионной стойкостью в агрессивных жидких и газообразных средах, радиационной стойкостью и устойчивы в расплавах Mg, Al, Cr, Co, Ni и их сплавов; кипящих кислотах - азотной, серной, соляной; в NaOH и KOH при 540–800°C; газах, содержащих серу, SO₂, CO, CO₂, H₂O при температурах до 1600°C; хлористом водороде при 400–600°C; сухом водороде при 1400–2000°C; гидротермальных условиях (растворимость в воде при 500°C и давлении 1030 ат. - $1,8 \times 10^{-4}$ %). Таким образом, изделия из лейкосапфира превосходят корундовую керамику по предельным температурам эксплуатации, чистоте, механической прочности, химической и радиационной стойкости.

Кристаллы лейкосапфира в основном выращивают путем вытягивания из расплава. При этом получается монокристалл округлой неправильной конусной формы - буля (рис. 1) Рост кристалла идет вдоль оси А (1120). Но изделия, как правило изготавливают в плоскости, нормальной оси С (0001).

При обработке лейкосапфира нужно принимать во внимание анизотропию свойств. Сапфир имеет гексагональную кристаллическую решетку. При этом практически все свойства кристалла различны по разным направлениям. Изделия нужно делать с учетом этого, а в технологию включают многократные операции проверки и уточнения положения этих осей, а саму обработку ведут с учетом их расположения. Для этого сначала на буле алмазным кругом срезают лыску перпендикулярно оси С, которую в первом приближении можно определить визуально по следам роста. Срезанный фрагмент кристалла используют для нахождения кристаллической оси уже с помощью приборов — оптических или рентгеновских. По результатам измерений положение оси на буле корректируют. Окончательно готовится лыска перпендикулярно оси С – исходная базовая плоскость (рис. 2).



Рисунок 1 - Исходная заготовка (буля) лейкосапфира



Рисунок 2 - Исходная базовая плоскость

Далее кристалл распускают на заготовки требуемой формы относительно этой оси. Из оставшейся части були в целях рационального использования материала изготавливаются заготовки для выращивания новых кристаллов.

Однако механическая обработка и получение изделий из лейкосапфира сопряжены с рядом трудностей. Хотя лейкосапфир и является перспективным конструкционным материалом, практически применимую информацию по его обработке на различных типах оборудования в открытой печати не найти.

Поскольку лейкосапфир является одним из твердых, но вместе с тем хрупким материалом, его обработку можно вести только алмазным инструментом, с помощью лазера или с применением специальных химических реагентов. Кроме того, дороговизна этого материала

не позволяет применять для обработки методы, в результате которых образуется большое количество шлама и отходов. Поэтому, например, для резки лейкосапфира наиболее целесообразно применять дисковые алмазные круги на металлической связке, при обработке которыми расход материала заготовки минимальный.

Как видно из рисунка 3 используются алмазные дисковые круги следующих видов: с сегментированной кромкой (рис. 3, а), с зубчатой кромкой (рис. 3, б, в), со сплошной кромкой (рис. 3, г) или с интегральным сегментом (рис. 3, д), который означает, что сегмент полностью встроен в тело диска.

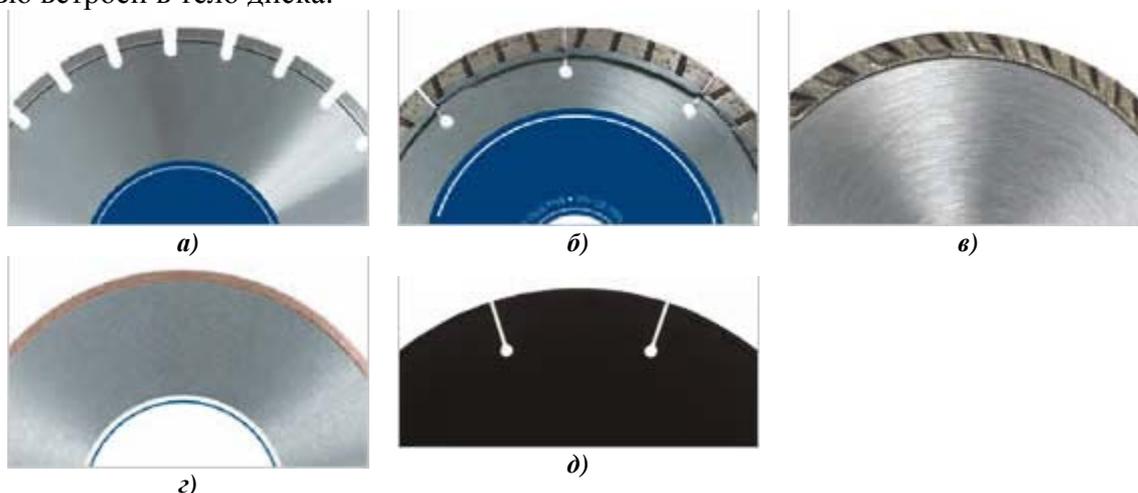


Рисунок 3 - Виды алмазных дисковых кругов

В состоянии поставки, как и по истечении некоторого времени (период стойкости) в процессе эксплуатации, алмазный круг характеризуется несовершенством геометрической формы. В первом случае это связано с погрешностями изготовления инструмента. Во втором – с неравномерностью износа, затуплением режущих зерен и засаливанием рабочей поверхности. В результате следует ожидать ухудшения качества обрабатываемых поверхностей, появления следов вибраций и дробления, выкрашивания.

К основным критериям, определяющим необходимость выполнения правки алмазных кругов, относятся следующие:

- снижение производительности шлифования;
- возрастание мощности шлифования (амперной нагрузки);
- образование на обрабатываемой кромке сколов;
- изменение геометрии обрабатываемой кромки.

При оптимальных условиях резания алмазный инструмент работает в режиме умеренного самозатачивания, не засаливается и не требует правки для условия резания, поэтому инструмент в процессе работы необходимо периодически править. Как правило, правку производят без охлаждения. Однако при резке лейкосапфира дисковыми алмазными кругами явление самозатачивания не наблюдается, а для минимизации получаемых в процессе обработки дефектов необходимо не допустить роста сил резания в зоне контакта шлифовального круга и обрабатываемой детали выше определенного значения. Это достигается поддержкой режущих свойств алмазных шлифовальных кругов на требуемом уровне, в частности их правкой, которая производится с целью восстановления точности формы, удаления шлама из межзернового пространства, обнажения новых режущих кромок алмазных зерен, устранения биения рабочего слоя алмазного круга относительно посадочного отверстия, удаления дефектов рабочей поверхности и образования требуемого профиля.

Правка кругов на металлической связке может выполняться следующими способами:

- а) правка абразивным бруском;
- б) шлифование твердыми абразивными кругами;
- в) правка свободным абразивом;
- г) электроэрозионная правка;
- д) электрохимическая правка.

Чтобы уменьшить биение кругов правку целесообразно проводить непосредственно на станке.

Метод обточки абразивным бруском является самым распространенным и простым методом правки алмазных кругов. При этом методе правки, алмазный круг остается на шпинделе, а поверхность алмазоносного слоя подвергают точению абразивным бруском, закрепленном в тисках на столе станка [1]. Недостатками такого метода являются большой расход брусков и малая производительность.

Метод правки абразивным кругом. Этот метод является более производительным. При этом виде правки по методу шлифования алмазный круг либо остается на шпинделе станка, либо его снимают со станка и закрепляют на оправке шлифовального или заточного станка. Поверхность алмазоносного слоя подвергается шлифованию абразивным кругом. Правка производится кругами из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого на керамической связке с зернистостью на один-два номера выше зернистости алмазного круга [2]. Правку кругов абразивным кругом применяют редко из-за низкой эффективности и большого расхода кругов и малой производительности.

Твердость абразивных кругов:

- М1-М1 – для алмазного инструмента на органической связке, а также для инструмента на металлической связках, предназначенного для чистовых операций;
- С1-СМ1 – для инструмента на металлической связке.

Скорости и режимы правки. Брусками – скорость алмазного инструмента, 30-40 м/с, продольная подача 0,3-0,5 м/мин, поперечная подача 0,02-0,04 мм/дв.ход.

Шлифованием – скорость алмазного инструмента 0,5-2,0 м/с, скорость правящего круга 25-35 м/с, продольная подача 0,5-1,5 м/мин, поперечная подача 0,02-0,04 мм/дв.ход.

Метод притирки свободным абразивным зерном на чугунных плитах. Абразивные зерна, свободно передвигаясь по поверхности алмазного круга, изнашивают связку, что приводит к удалению затупившихся и обнажению новых острых зерен. Чтобы предотвратить контакт алмазных зерен с чугунной плитой, зернистость абразивного порошка следует выбирать несколько большую, чем зернистость алмазного круга. Такой метод применяется для правки кругов 12А2-45, 6А2, 6А2Т. Метод обеспечивает высокую абразивную способность алмазного круга после правки. Недостатком является необходимость снятия круга со станка, такая правка практически не выводит биения рабочей поверхности [1].

Метод электроэрозионного вскрытия зачастую применяется для правки фасонных кругов 2F6V, 1F6V, 14F6V, 1FF6V, 1EE1V на металлической связке. Правка кругов происходит за счет эрозии (разрушения) связки кругов при импульсных электрических разрядах с высокой концентрацией энергии. Для осуществления правки необходимо иметь источник питания (генератор импульсов), систему подачи рабочей жидкости и электроды, между которыми проходят разряды. Алмазный круг является анодом, а электрод-инструмент — катодом.

Правку производят дисковым графитовым (чугунным) или латунным электродом квадратного (круглого) сечения. В процессе правки в зазор между алмазным кругом и электрод-инструментом подают рабочую жидкость (например, трансформаторное масло) в количестве 4 — 5 л/мин.

Напряжение должно быть 18 — 24 В при предварительной и 8 — 12 В при окончательной правке. Сила тока 5 — 12 А. Частота вращения алмазного круга 80 — 100 об/мин; дискового электрод-инструмента 300 об/мин [1, 2, 3].

Производительность обработки алмазными кругами, правленными электроэрозионным методом, значительно выше по сравнению с кругами, правленными методом шлифования абразивным кругом.

Данным методом позволяет точно восстановить рабочий профиль инструмента и его режущие способности, однако требует специального электроэрозионного оборудования.

Электрохимический метод правки алмазных кругов на металлических связках находит широкое применение, так как он более производительен, чем абразивная правка. В процессе правки круг на токопроводящей связке работает при обратной (по сравнению с

обычной электроалмазной заточкой) полярности тока, т.е. в данном случае круг — анод, а обрабатываемый инструмент — катод (катодный метод). В процессе правки происходит непрерывное анодное растворение связки рабочей поверхности круга, а не обрабатываемой детали, благодаря чему зерна обнажаются и улучшаются условия их резания.

Метод электрохимической правки применяют на станках, предназначенных для электроалмазного шлифования и заточки. Правку производят при таких же режимах, как и электроалмазную заточку, хотя напряжение электрического тока устанавливают несколько ниже. В этом случае достигают высокой режущей способности и износостойкости кругов [1, 3].

Наиболее эффективным считается правка кругов с помощью электрохимического растворения и электроэрозионного разрушения связки их алмазоносного слоя непосредственно в процессе шлифования обрабатываемых заготовок (что дает возможность автоматизации правки). С целью правки изменяют полярность электродов – круг становится анодом – и обычно повышают рабочее напряжение до 24 В и выше с целью интенсификации электроэрозионного съема. Величины подачи и глубину резания также снижают до возможно минимальных значений. Как правило, правку осуществляют, продолжая шлифовать обрабатываемую заготовку.

На рисунке 4 представлена принципиальная схема установки для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке, разработанная на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета.

Алмазный круг 1 устанавливают на шпиндель установки. Привод обеспечивает вращение шпинделя с частотой 20 мин⁻¹. К кругу подведены с минимальным зазором подпружиненные два графитовых электрода 3. На электроды подается питание от однопериодного выпрямителя. Напряжение можно менять от 20 до 50. Круг частично погружен в ванну 2 со смесью масла и керосина. При вращении круга происходят электрические разряды в местах контакта круга и электродов. В результате разряда происходят микроразрушения электродов и круга.

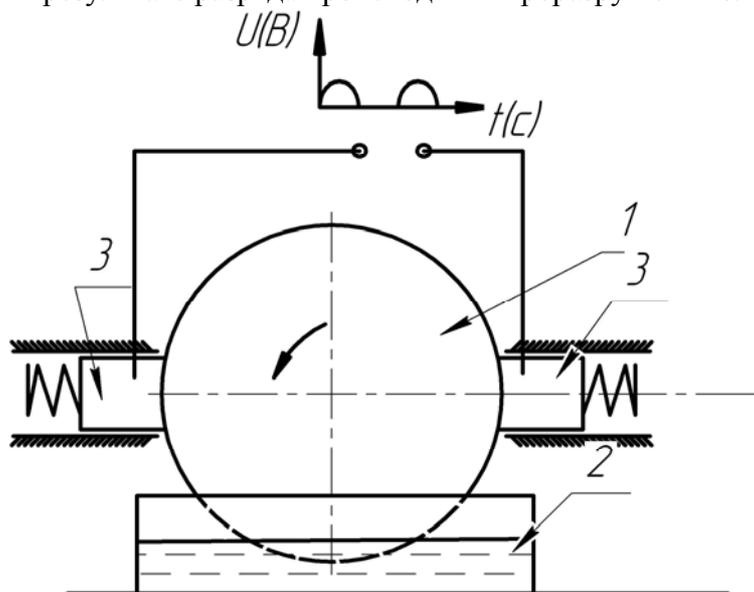


Рисунок 4 - Схема установки для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке

Захватываемая смесь масла и керосина охлаждает зону контакта и вымывает из нее продукты износа. Вторая схема работы предусматривает подачу напряжения на круг через щетку. В этом случае используют только один правящий электрод. Спроектированная установка показана на рисунке 5.

Полностью затупившийся алмазный круг может быть выправлен на такой установке за 0,25...0,75 час.

Также правка была выполнена непосредственно на станке. Для этого с помощью частотного преобразователя устанавливалась частота вращения шпинделя в пределах 100 мин⁻¹. После этого велась правка по схеме, показанной на рисунке 4. Правка на станке дала возможность не только восстановить режущие свойства круга, но и снизить биение до величин 0,01-0,02 мм.

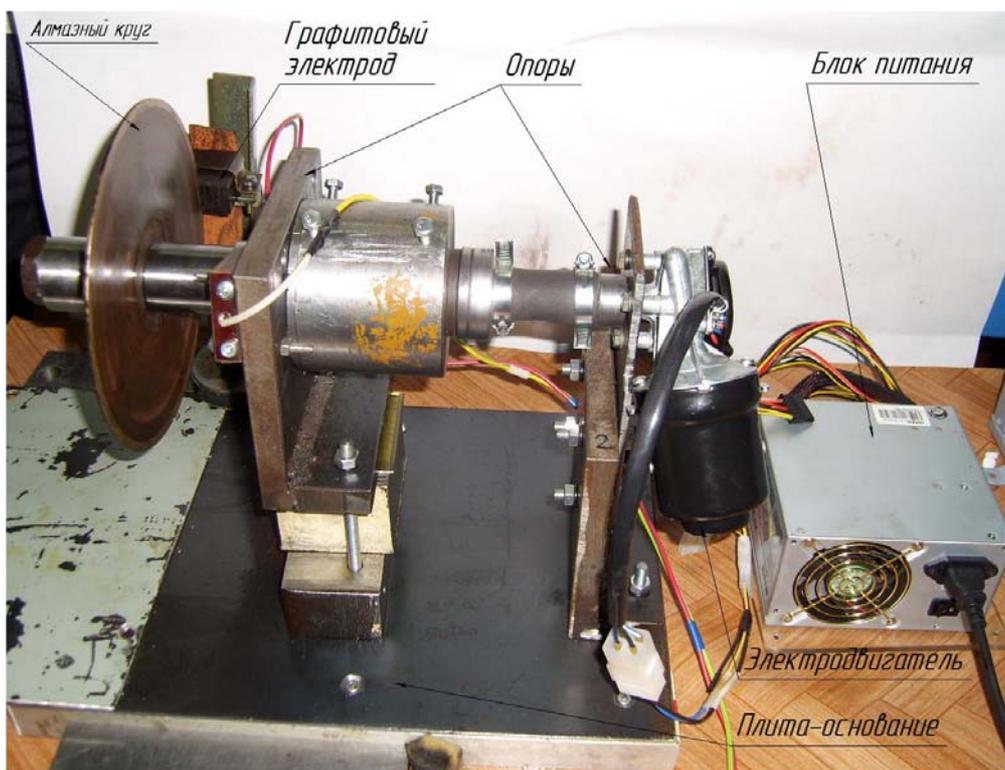


Рисунок 5 - Установка для электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке

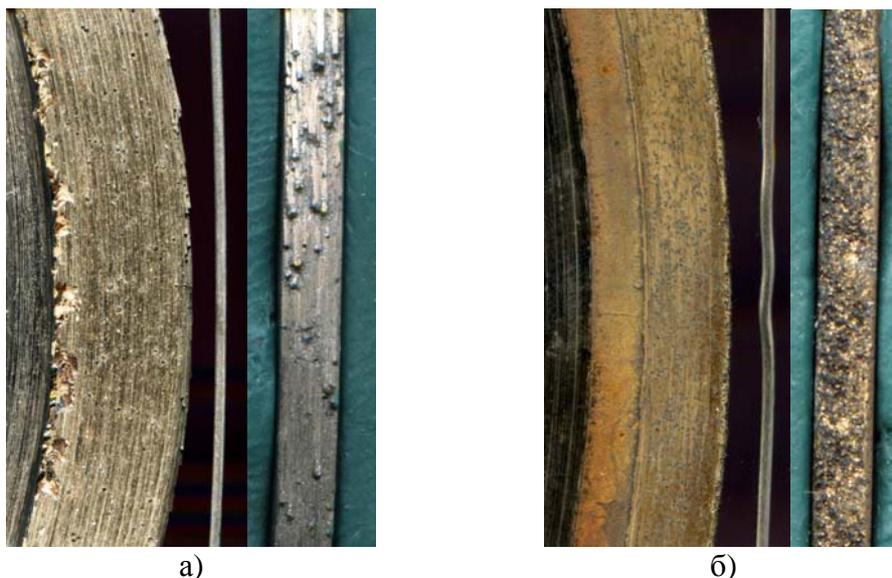


Рисунок 6 - Периферия и торец нового и правленного алмазных кругов

Были проведены исследования эффективности такого способа восстановления. На рисунке 6 показаны периферия и торец нового алмазного дискового круга (рис. 6, а) и круга после правки (рис. 6, б). В качестве эталонного размера на фотографиях показана проволока $\varnothing 1$ мм. Livny Branch of FSBEI HVT «State University – ESPC», Livny

Визуальное сравнение показывает, что электроэрозионная правка создает на рабочей поверхности круга рельеф.

Зерна алмаза при этом освобождаются от связки. Эти два факта являются предпосылкой для восстановления режущих свойств круга. Однако, на фотографиях хорошо видны отличия исходной поверхности и заправленной. У кругов в состоянии поставки зерна сильно выступают над профилем. При этом сами зерна имеют неправильную форму с острыми гранями. У круга после правки вид несколько иной. Зерна закруглены, изношены и заглублены относительно номинальной поверхности шлифовального круга.

Увеличение времени правки позволяет сделать рельеф глубже, освободить зерна от связки почти полностью. Но при этом наблюдается устойчивое потемнение цвета режущих зерен. Можно предположить, что под воздействием многочисленных электрических разрядов начинается разложение алмазных зерен, их графитизация.

Предположения, сделанные на основе визуального осмотра рабочих поверхностей, подтвердилось при испытаниях. Круги после правки в значительной мере восстанавливают свои режущие свойства. Тем не менее, по сравнению с новыми кругами период стойкости снижается на 20-30%. Наблюдается и некоторый рост сил резания запрограммированным кругом.

Правка непосредственно на станке позволяет существенно снизить биения круга. Это в свою очередь ведет к улучшению условий резания — снижается шум, вибрации, уменьшаются сколы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашук, В. А. Справочник заточника [Текст] / В. А. Кашук, А. Д. Мелехин, Б. П. Бармин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1982. – 232с., ил. – (Серия справочников для рабочих).
2. Муцяно, В. И. Основы выбора шлифовальных кругов и подготовка их к эксплуатации [Текст] / В. И. Муцяно. – Л. : Машиностроение, 1987. – 134 с.
3. Любимов, В. В. Комбинированные методы алмазного шлифования [Текст] : учебное пособие / В. В. Любимов, В. А. Могильников, М. Я. Чмир. – изд. 2-е, испр. и доп. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2007. – 100 с.

Аверкина Наталия Евгеньевна

ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Инженер

E-mail: msi@tu-bryansk.ru

N.E. AVERKINA

THE REVIEW OF METHODS OF CORRECTION OF DIAMOND CIRCLES ON METAL COPULA

Questions, related to the correction of disk diamond circles on a metallic copula at treatment of leykosapfira, are expounded in the article. The basic types of correction are considered, and also the chart of fluidizer electro-erosive correction of diamond circles is resulted on a metallic copula. The analysis of basic problems, arising up at the correction of circles is executed.

Keywords: *leykosapfira; disk diamond circles on a metallic copula; correction; polishing correction; a free abrasive hard abrasive circles; an abrasive bar; electro-erosive correction; electrochemical correction.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kashchuk V.A., Melekhin A.D., Barmin B.P. Reference Book for Tool Dresser, - 2-d Edition revised and supplemented -: Mechanical Engineering, pp. 232, 1982, (Set of Reference Books for Workers).
2. Mutsyanko V.I., Fundamentals for Choice of Abrasive Disks and Their Preparation for Operation / V.I. Mutsyanko. – L.: Mechanical Engineering, pp. 134, 1987.
3. Lubimov V.V., Combined Methods for Diamond grinding: Textbook: Revised and Supplemented Edition./ V.V. Lubimov, V.A. Mogilnikov, M.Ya. Chmir.- Tula: Publishing House of TulSU, pp. 100, 2007.

Averkina Natalia Yevgenievna

FSBEI HVT «Bryansk State University», Bryansk

Engineer

E-mail: msi@tu-bryansk.ru

А.А. АЛЕКСАНДРОВ, Г.В. БАРСУКОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА МАСС АБРАЗИВНОЙ СМЕСИ ДЛЯ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЕЙ

Авторами статьи разработано базовое условие для выбора компонентного состава масс двухкомпонентной абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей.

Ключевые слова: абразив, гидроабразивное резание, смесь абразивов

В стратегии развития Российской Федерации до 2020 г. приоритетной проблемой определена модернизация отечественной экономики. Основой технического перевооружения всех отраслей промышленности является машиностроительное производство, которое занимает центральное место в экономике всех высокоиндустриальных стран.

Сложность современной машиностроительной продукции выросла в среднем в 6 раз за последние три десятилетия. Из общего числа типоразмеров деталей, изготавливаемых в механообработывающем производстве, наибольшая часть (более 2/3 общей номенклатуры) приходится на плоские, а также фигурные, профильные и другие детали сложной формы. Плоские детали сложной формы, не относящиеся к телам вращения, имеют значительное число наименований (более 50 % номенклатуры) и составляют 20 – 30 % от общей стоимости механообработки.

Для изготовления плоских деталей из листа широкое применение находят механические методы обработки. Однако при резании по сложному контуру возникают недостатки, связанные с низкой производительностью, сложностью и высокой стоимостью отрезного инструмента (штамповая оснастка), трудностью или невозможностью раскроя.

За последние годы в мировой практике накоплен значительный опыт резания материалов по сложному контуру с использованием электрофизического, электрохимического и физико-химического воздействия. Их преимущества наиболее значимы в среднем и общем машиностроении, где основная масса листовых заготовок имеет толщину до 5 – 10 мм.

В сложившихся технико-экономических условиях отечественной экономики основная доля в производстве товарной продукции приходится на тяжелое машиностроение и составляет 60% от общего объема. Затраты на сырье и материалы здесь составляют от 40 до 85 %, а главной особенностью является использование для получения деталей толстолистового проката толщиной от 20 до 150 мм.

Большая толщина листа резко снижает производительность и точность лазерного, плазменного и механического резания, а для получения сложного контура применяют последующую обработку по периметру детали, трудоемкость которой превышает время разделения материала.

Одной из ключевых технологий, радикально решающей вопросы производства деталей на предприятиях тяжелой промышленности, является резка гидроабразивной струей [1, 2].

Несмотря на множество преимуществ резания материалов гидроабразивной струей, высокие эксплуатационные расходы ограничивают его использование в промышленности, поскольку абразивы, используемые в таких процессах, существенно повышают операционные затраты.

Традиционно используют абразив типа граната, добываемого в Австралии или Китае, позволяющий резать металлы и хрупкие материалы. Гранат имеет приемлемую твердость для резания большинства металлов и причиняет меньший износ соплу. Однако его использование связано с финансовыми затратами, потому что это - относительно редкий минерал, а процесс его очистки дорогостоящ.

Использование сверхтвердых абразивов типа электрокорунда и карбида кремния оказалось непрактичным, потому что они оказывают влияние на быстрый износ сопла (фокуси-

рующей трубки). Даже, когда фокусирующая трубка изготовлена из сверхтвердого материала на основе соединений карбида, срок ее службы может составлять несколько минут [3].

Поэтому возникает потребность в разработке новых составов абразивных масс технологической среды менее дорогостоящих, обеспечивающих приемлемую производительность, что позволит расширить область применения данного процесса.

Исследования авторов основаны на научных результатах, полученных за последние 10 лет в области разрушения материалов при сверхзвуковых взаимодействиях. В частности использованы новые знания о закономерностях объемного уноса обрабатываемого материала от характеристик абразива [4, 5].

Авторами разработана методика подбора состава абразивных масс технологической среды на основе вторичных техногенных неорганических веществ для обеспечения заданной производительности и себестоимости гидроабразивного резания.

Однородность состава абразивных масс, является основой требуемого качества технологической среды для гидроабразивного резания. От того, насколько равномерно отдельные компоненты будут распределены в основном объеме смеси, напрямую зависят эксплуатационные характеристики получаемого продукта. Даже небольшое отклонение содержания малых сверхтвердых абразивных добавок, вызванное плохим их распределением, может негативно сказаться как на качестве поверхности детали, так и на производительности обработки.

Соответственно, разработка технологического процесса производства абразивной технологической среды, является важнейшим шагом на пути получения высококачественного продукта.

Анализ методов смешивания сыпучих сред показал, что для получения абразивной смеси для гидроабразивного резания можно применить следующие типы смесителей: гравитационные, центробежные, барабанные, вибрационные, червячно-лопастные, лопастные.

Установлено, что для подготовки абразивной смеси для гидроабразивного резания необходимо применить смесители, которые легко переналаживаются на переработку разнообразных абразивных сред с различным весовым соотношением и физико-механическими свойствами, а также смесители низкой стоимости, что позволяет использовать их на малых и средних предприятиях.

На основе проведенного анализа методов смешивания сыпучих сред, выбран лопастной смеситель циклического действия с горизонтальным валом, для которого характерна большая гибкость при работе с часто меняющимся составом смеси. Цикличность процесса смешивания компонентов позволяет приготавливать сложные составы в объеме, равному одному замесу. Лопастные смесители позволяют управлять процессом смешения, обладают универсальностью, высокой производительностью, быстрой и несложной переналадкой для работы с различными абразивными материалами.

Установлено, что модернизация существующих конструкций лопастных смесителей для получения абразивной смеси для гидроабразивного резания возможно только на данных собственных экспериментальных исследований.

Поэтому ввиду малой изученности процесса и отсутствия универсальной физической модели перераспределения частиц материала внутри лопастного смесителя, необходимы экспериментальные и теоретические исследования механизма смешения в нем с целью совершенствования методов расчета и конструкций лопастных смесителей, а так же назначения режимов смешивания.

В работе были проведены экспериментальные исследования, позволившие изучить влияние физико-механических свойств абразивных материалов, способа загрузки исходных компонентов в смеситель на однородность состава.

На основе проведенных экспериментальных исследований рекомендуется при подготовке оптимальной абразивной технологической среды на основе вторичных техногенных неорганических веществ для гидроабразивного резания обеспечить режущие возможности не ниже, чем при использовании гранатового абразива за счет введения абразивов с высокой и сверхвысокой твердостью.

Для различных толщин и типов материалов определены режимы гидроабразивного резания с учетом режущих возможностей каждого компонента технологической среды.

Разработано базовое условие по выбору рационального состава абразивных масс технологической среды гидроабразивного резания. Например, для двухкомпонентной абразивной смеси необходимо обеспечить следующее условие:

$$\frac{T_{\text{ад}}n_{\text{ад}} + T_1n_1}{T_2} \leq n_2, \quad (1)$$

где T_1 - твердость первого компонента смеси, ед. по Моосу;

T_2 - твердость второго компонента смеси, ед. по Моосу;

$T_{\text{ад}}$ - твердость граната, ед. по Моосу;

n_1 - количество абразивных зерен первого компонента смеси, шт;

n_2 - количество абразивных зерен второго компонента смеси, шт;

$n_{\text{ад}}$ - количество абразивных зерен граната, шт.

Рекомендуется тип абразивного материала смеси и его дозировку назначать в зависимости от твердости абразива и необходимого количества для осуществления сквозного резания обрабатываемого материала.

Рекомендуется вводить в состав двухкомпонентной смеси, как основной материал смеси - абразив со средней твердостью 4,0 – 6,0 по Моосу, а в дополнение более твердый от 6,0 до 7,5 по Моосу, например, оливин или абразивы на основе вторичных техногенных неорганических веществ.

За оптимальные условия гидроабразивного резания приняты условия резания гранатовым абразивом.

Теоретические и экспериментальные исследования влияния различных компонентов технологической среды на качество и производительность гидроабразивного резания, позволили сделать следующие выводы:

1. Твердость первого компонента значительно влияет на концентрацию второго компонента абразивной смеси. Так при твердости первого компонента 5 ед. по Моосу, требуется около 30 % второго компонента смеси с твердостью 6,5 – 7,5 по Моосу.

2. Учитывая, что износ сопла увеличивается с повышением твердости абразива, то при использовании сверхтвердых абразивов с твердостью около 9 ед. по Моосу рекомендуется ограничить концентрацию этого компонента до 20 %. (рисунки 1, 2).

Проектирование состава абразивных масс технологической среды для гидроабразивного резания, содержащей абразивные частицы со средней, высокой и сверхвысокой твердостью, осуществляют путем подбора пропорции из рекомендуемых пределов соотношения масс для резания хрупких, твердых и высокопрочных материалов, причем пропорции указанных компонентов выбирают в соответствии с процедурой оптимизации состава, которая обеспечивает получение абразивной смеси, обладающей заданной режущей способностью при минимальном износе сопла, без применения обычных испытаний путем проб и ошибок, причем этот способ включает следующие этапы:

1) расчет объемного уноса обрабатываемого материала единичным абразивным зерном со средней, высокой и сверхвысокой твердостью [6];

2) расчет объемного уноса материала сопла единичным зерном со средней, высокой и сверхвысокой твердостью;

3) расчет критического объемного уноса материала сопла,

4) расчет максимального количества абразивных частиц проходящих через сопло;

5) расчет необходимого объемного уноса обрабатываемого материала в единицу времени;

6) оптимизация пропорции абразивной смеси с применением методов математического программирования и, в частности, линейной оптимизации.

Таким образом, для гидроабразивного резания рекомендуется следующий состав абразивных масс технологической среды на основе вторичных техногенных неорганических ве-

ществ: абразивные частицы первого компонента с высокой твердостью типа гематита, магнитного железняка, циркона и рутила и т.п. при соотношении масс 30 - 100%, второго компонента со средней твердостью типа оливин 0 – 70 % и третьего компонента со сверхвысокой твердостью типа алмаза, топаза, сапфира, корунда, электрокорунда, карбида бора и карбида кремния с содержанием 0 – 20 %. Причем первый тип абразивных частиц рекомендуется использовать для резания стекла, камня и других хрупких материалов. Комбинацию абразивов первого и второго компонента рекомендуется применять для резки металлов, а с добавлением абразива третьего типа разрезать толстые высокопрочные металлы или керамику.

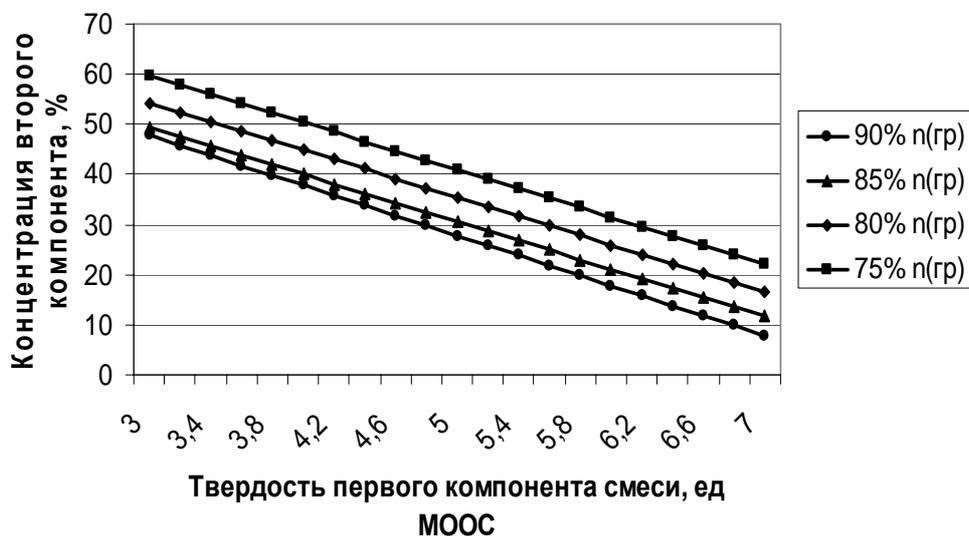


Рисунок 1 - Влияние твердости первого компонента абразивной технологической среды на концентрацию второго компонента: толщина реза 10 мм, подача 200 мм/мин, твердость второго компонента 9 ед. Моос

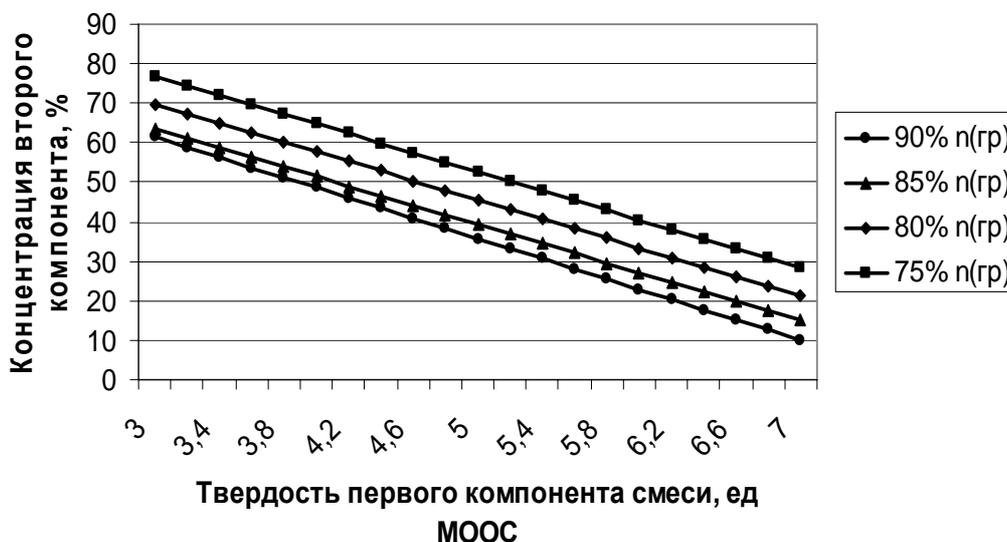


Рисунок 2 – Влияние твердости первого компонента абразивной технологической среды на концентрацию второго компонента: толщина реза 10 мм, подача 200 мм/мин, твердость второго компонента 7 ед. Моос

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков, Г.В. Управление качеством и дискретное регулирование технологической системы гидрорезания [Текст] / Г.В. Барсуков // Справочник. Инженерный журнал. - 2004. - № 7. - С. 53 - 57.
2. Степанов, Ю.С. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 4-2. – 2010. – С. 65 – 70.
3. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. С. 9 – 14.
4. Барсуков, Г.В. Технологическое обеспечение шероховатости, точности формы и расположения поверхностей детали после гидроабразивного резания [Текст] / Г.В. Барсуков // Справочник. Инженерный журнал. - 2005. - № 9. - С. 22 – 26.

5. Степанов, Ю.С. Формирование качества поверхностного слоя деталей при резании сверхзвуковой струей жидкости [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков // СТИН. - 2003. - № 10. - С. 15 –17.

6. Барсуков, Г.В. Моделирование числа абразивных зерен, участвующих в процессе формирования поверхности детали при резании сверхзвуковой гидроабразивной струей [Текст] / Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев // Вестник БГТУ. – 2009. – С. 15 – 19.

Александров Артем Александрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Аспирант кафедры ТМиКТИ

Тел. (4862) 419818

E-mail: upk@ostu.ru

Барсуков Геннадий Валерьевич

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Д-р техн.наук, профессор кафедры ТМиКТИ

Тел. (4862) 419818

E-mail: awj@list.ru

A.A. ALEXANDROV, G.V. BARSUKOV

**DETERMINATION OF THE COMPONENT COMPOSITION OF
THE MASSES A MIXTURE OF ABRASIVE MATERIAL
FOR CUTTING SUPERSONIC WATERJET STREAM**

The authors developed a basic condition for the choice of a two-component composition of the mass of abrasive mixture to a supersonic waterjet cutting material stream.

Keywords: *abrasive, abrasive waterjet, a mixture of abrasives*

BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov G.V. Quality Control and Discrete Control of Hydrocutting Technological System, [Text] / G.V. Barsukov // Reference Book, Engineering Journal. - № 7, pp. 53-57, 2004.

2. Stepanov Yu.S. Simulation of multilayer barrier with gas gap under influence of supersonic flow of abrasive particles, [Text] / Yu.S. Stepanov, G. V. Barsukov, A.V. Mikheyev // Fundamental and Engineering Problems in Technique and Technology. - № 4-2, pp. 65-70, 2010.

3. Barsukov G.V. Definition of Hydroabrasive Cutting Productivity Taking into Account Abrasive Grain Properties, [Text] / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev // Reference Book. Engineering Journal.- № 1, pp.9-14, 2008.

4. Barsukov G.V. Engineering Support of Roughness, Form Accuracy and Part Surface Location after Hydroabrasive Cutting, [Text] / G.V. Barsukov // Reference Book. Engineering Journal, № 9, pp. 22-26, 2005.

5. Stepanov Yu.S. Quality Formation on Parts Surface Layer at Supersonic Jet Cutting , [Text] / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov // STIN.- № 10,- pp. 15-17, 2003.

6. Barsukov G.V. Simulation of Number of Abrasive Grains Participating in Part Surface Formation at Supersonic Hydroabrasive Jet Cutting,[Text] / G.V. Barsukov, Yu.S. Stepanov, A.V. Mukheyev // Bulletin of BSTU, - pp. 15-19, 2009.

Artem Alexandrovich Alexandrov

Polikarpov Technological Institute

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Post graduate student

E-mail: upk@ostu.ru

Gennady Valerievich Barsukov

Polikarpov Technological Institute

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Dr.Sc.tech., Department «Mechanical engineering and design-engineering informatics»

Phone. (4862) 419818

E-mail: awj@list.ru

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, С.А. СИЛАНТЬЕВ

АДАПТАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ МОЛОТОВ ДЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены возможности применения для упрочнения поверхностным пластическим деформированием существующих конструкций ударных устройств. Даны рекомендации при адаптации ударных устройств с гидро- и электроприводом.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, гидромолот, электромолот

Упрочняющая обработка является одной из основных технологических операций, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики деталей машин. Упрочнение методами ППД отличается сравнительно низкой энергоемкостью и простотой реализации, созданием упрочненного поверхностного слоя, обладающего большой глубиной и твердостью (до 6000 МПа), сжимаемыми остаточными напряжениями, благоприятно влияющими при действии на деталь циклических нагрузок.

Для пластического деформирования упрочняемой поверхности может использоваться как статическое, так и ударное нагружение. Энергетически использование ударов по сравнению со статическим воздействием более выгодно [1, 2]. Однако широкое применение ударных способов ППД часто сдерживается отсутствием необходимого оборудования для упрочнения. Ударных устройств, специально предназначенных для упрочнения ППД, промышленно не изготавливают. Как правило, для упрочнения ППД адаптируют молоты, изначально предназначенные для других целей, например для разрушения твердых материалов при дорожно-строительных или горных работах.

Для адаптации существующих конструкций молотов под упрочнение ППД необходимо учитывать следующие требования:

- энергия ударов не менее 5...10 Дж, для того чтобы пластическая деформация нагружаемой поверхности обеспечивала достаточную глубину и степень упрочнения;
- высокая частота ударов (до 40 Гц), позволяющая увеличить производительность упрочнения;
- независимое регулирование частоты и энергии ударов, позволяющее изменять частоту ударов при постоянной энергии и наоборот, что необходимо для обеспечения требуемого перекрытия пластических отпечатков, наносимых на упрочняемую поверхность, когда частота ударов и подача должны быть согласованы с размерами отпечатков [1];
- высокий КПД, снижающий энергоемкость процесса упрочнения;
- низкая металлоемкость, позволяющая устанавливать ударное устройство на металлообрабатывающее оборудование (токарные, фрезерные, строгальные, накатные станки или специально разработанную установку);
- возможность управления формой ударных импульсов, использование для этого нагружения ударной системой состоящей из бойка и волновода, имеющих рассчитанные по специальной методике геометрические параметры [3, 4].

При выборе конструкции ударного устройства для адаптации в первую очередь необходимо ориентироваться на габаритные размеры и форму упрочняемых поверхностей. Так при упрочнении крупногабаритных деталей машин, таких как сердечники крестовин стрелочных переводов, рабочие органы строительно-дорожных машин, крупные валы, зубчатые колеса и др., когда на большой площади упрочняемой поверхности необходимо получать большую глубину и степень упрочнения целесообразно применять молоты с энергией ударов до 100...300 Дж. Для менее габаритных деталей, таких как бойки и толкатели, элементы подшипников качения, червячных и винтовых передач и др. часто достаточно использования молотов с энергией ударов до 10...50 Дж.

В зависимости от энергии ударов промышленные молоты должны обладать соответствующим приводом, обеспечивающим их наибольшую эффективность.

Для получения больших энергий ударных импульсов (до 100...300 Дж) хорошо зарекомендовали себя ударные устройства с гидравлическим приводом, которые обладают высоким КПД, достигающим 50...80% и при этом относительно малыми габаритными размерами.

На основе известных конструкций гидромолотов для горных работ [5] для упрочнения ППД авторами разработан гидравлический генератор импульсов (рис. 1) [6-8, Пат. № 2090342 РФ, Бюл. № 26, 1997].

Техническая характеристика гидравлического генератора импульсов

Энергия удара, Дж.....	60...300
Пределы регулирования частоты ударов, Гц	3...40
Давление рабочей жидкости, МПа	16
Расход рабочей жидкости, л/мин	50
Максимальная мощность, кВт	8,5
Масса, кг	90
Габаритные размеры, мм	220× 950× 295
Металлоемкость, кг/Дж	0,3
КПД.....	0,6

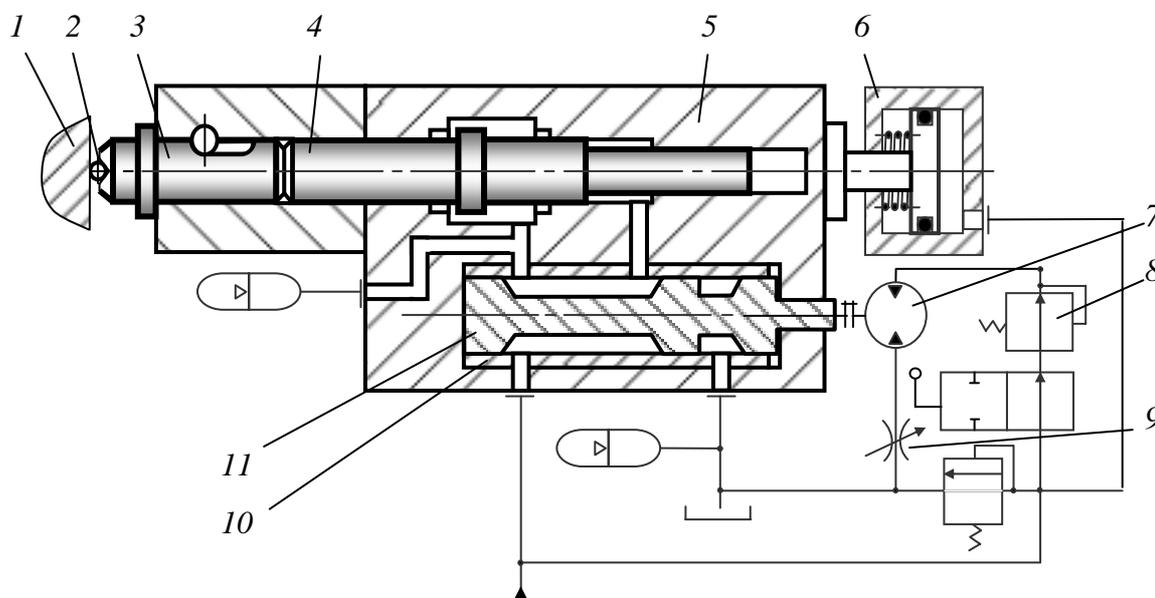


Рисунок 1 – Гидравлический генератор импульсов для упрочнения ППД:

1 – заготовка, 2 – инструмент, 3 – волновод, 4 – боек, 5 – корпус, 6 – гидроцилиндр статического нагружения, 7 – гидродвигатель, 8 – редукционный клапан, 9 – дроссель, 10 – гильза кранового распределителя, 11 – вращающийся золотник кранового распределителя

Выбор данных конструкций гидромолотов был обоснован тем, что они обеспечивают достаточно широкий диапазон регулирования энергии ударов, относительно высокий КПД и низкую металлоемкость. Частота ударов регулировалась частотой вращения золотника кранового распределителя, обеспечиваемой специальной турбинкой, которая приводится в движение жидкостью, выталкиваемой на слив из разгонной полости. При их адаптации (рис. 1) золотник 11 кранового распределителя, которым регулируется частота ударов, был жестко соединен с гидродвигателем 7 смонтированным на корпусе 5. Использование гидродвигателя 7, подключенного к гидросистеме через редукционный клапан 8, обеспечивающего требуемое давление рабочей жидкости, позволяет осуществлять независимое регулирование частоты ударов от энергии. Таким образом, изменение давления в гидросистеме не будет влиять на частоту вращения золотника распределителя, а, следовательно, и частоту ударов генератора импульсов. Регулирование частоты импульсов осуществляется дросселем 9.

Устройство работает следующим образом. При включении гидросистемы рабочая жидкость под давлением поступает в штоковую полость генератора импульсов и гидропнеumoаккумулятор, заряжая его, чтобы затем использовать накопленную энергию при разгоне бойка. Одновременно рабочая жидкость под давлением поступает в поршневую полость гидроцилиндра статического нагружения 6, производя через корпус 5 и волновод 3 статическое поджатие инструмента 2 к упрочняемой поверхности 1. Предварительное статическое поджатие является необходимым условием для начала работы таких ударных устройств. При включении распределителя жидкость поступает в гидродвигатель 7, который начинает вращать золотник 11, кранового распределителя. При совпадении положения окон гильзы 10 и ротора 11 рабочая жидкость подается в поршневую полость генератора импульсов. Под действием напора рабочей жидкости боек 4 ускоренно перемещается вперед и наносит удар по торцу волновода 3. При этом в ударной системе боек-волновод генерируются ударные волны создающие в пятне контакта деформирующего инструмента и обрабатываемой поверхности ударные импульсы требуемой формы.

Обратный ход бойка осуществляется при последующем перемещении ротора 11 кранового распределителя на 45°. При этом ротор соединяет поршневую полость со сливной магистралью, после чего боек 4 движется вправо, увеличивая объем штоковой полости. Жидкость из поршневой полости выталкивается на слив, а подсоединенный к сливной магистрали гидропнеumoаккумулятор компенсирует избыточное давление слива, предотвращая возможные перегрузки системы.

Для того чтобы формировать ударные импульсы с формой, позволяющей передавать максимальное количество кинетической энергии ударов упрочняемой поверхности, на основании известных размеров бойка, изготавливался волновод, геометрические размеры которого должны удовлетворять условиям [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} d_6/d_b &= 1 \dots 3; \\ L_6/L_b &= 3 \dots 5; \\ L_b/d_b &> 3, \end{aligned} \right\} (1)$$

где d_6 , d_b и L_6 , L_b – соответственно диаметры и длины бойка и волновода.

В результате использования для упрочнения данной конструкции гидравлического генератора импульсов был получен упрочненный поверхностный слой с твердостью до 6000 МПа и глубиной 6...10 мм.

При обработке малогабаритных деталей, когда для упрочнения достаточно энергии ударных импульсов не превышающей 10...50 Дж, эффективно могут использоваться отбойные электромолоты, предназначенные для строительных работ (разрушения твердых, слежавшихся и мерзлых грунтов, для ломки бетонных покрытий, асфальта и кирпичной кладки). Достоинством использования для упрочнения ППД таких устройств является изначально заложенное в конструкции независимое регулирование энергии и частоты ударов, малые габаритные размеры, относительно (гидромолотов) низкая стоимость, относительно (пневмомолотов) высокий КПД (40...50 %), отсутствие необходимости использования дополнительных устройств энергоснабжения привода, таких например как маслостанция для гидромолотов или компрессор для пневмомолотов.

Принцип действия электромолотов заключается в следующем. Электродвигатель 9 установленный в корпусе молота (рис. 2) через одноступенчатый редуктор 8 вращает кривошипный вал 7. При этом шатун 6, соединенный с кривошипом, сообщает поршню 5 возвратно-поступательное движение. При ходе поршня вправо во внутренней полости бойка 4 под поршнем возникает разрежение. В результате этого боек начинает двигаться вслед за поршнем, взвоясь для разгона. В это время поршень, пройдя мертвое положение, начинает двигаться влево навстречу бойку, и воздух, находящийся между бойком и поршнем, начинает сжиматься. Боек останавливается, а затем перемещается вправо (рабочий ход). В конце рабочего хода боек наносит удар по торцу волновода 3, воздействуя через инструмент 2 на упрочняемую поверхность 1.

Так же как и в гидравлическом генераторе импульсов для начала работы электрического необходимо его предварительное статическое поджатие к нагружаемой поверхности, но со значительно меньшей силой, которая может обеспечиваться винтовыми механизмами перемещений исполнительных узлов оборудования, где он устанавливается.

Техническая характеристика электрического генератора механических импульсов	
Наибольшая энергия ударов, Дж.....	25
Частота ударов, Гц.....	23,3
Сила нажатия, не менее, Н.....	160
Потребляемая мощность, кВт.....	1,5
Потребляемое напряжение, В.....	220
Потребляемая частота, Гц.....	50
Габаритные размеры, мм.....	475×120×235
Масса (без кабеля и рабочего инструмента), кг.....	15
Металлоемкость, кг/Дж	0,6
КПД.....	0,4

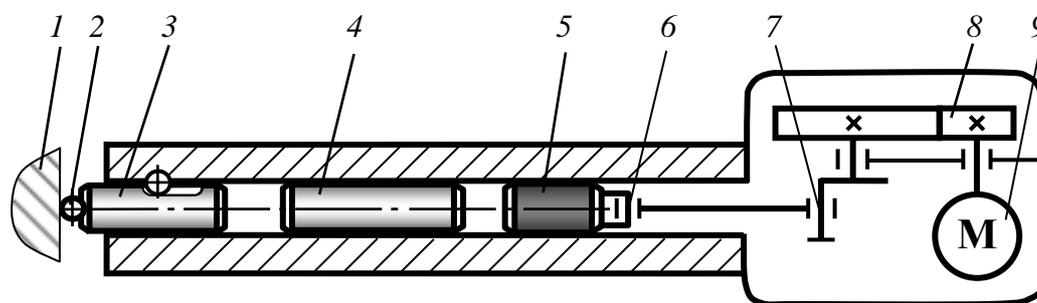


Рисунок 2 – Электрический генератор импульсов для упрочнения ППД:
 1 – заготовка, 2 – инструмент, 3 – волновод, 4 – боек, 5 – поршень, 6 – шатун,
 7 – кривошипный вал, 8 – редуктор, 9 – электродвигатель

При адаптации электрического генератора импульсов геометрические параметры волновода были выполнены исходя из обеспечения в очаге деформации ударных импульсов требуемой формы, с учетом существующих геометрических параметров бойка и условий (1).

В результате использования для упрочнения СИО данной конструкции электрического генератора импульсов получен упрочненный поверхностный слой, твердость которого достигала 6000 МПа, а глубина до 4...6 мм.

Исследования проводились при поддержке проекта, выполняемого в рамках гос. задания р/н 75052011

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А. В. Влияние режимов статико-импульсной обработки на равномерность упрочнения поверхностного слоя [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 2. – С. 13 - 17.
2. Киричек, А. В. Технологические возможности статико-импульсной обработки [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 8. – С. 3 - 5.
3. Киричек, А. В. Нагружение материала волной деформации в процессе статико-импульсной обработки [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2003. – №3. – С. 33 - 36.
4. Киричек, А. В. Волновые состояния ударной системы боек-волновод при статико-импульсной обработке [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 24 - 30.
5. Ушаков, Л. С. Гидравлические машины ударного действия [Текст] / Л. С. Ушаков, Ю. Е. Котылев, В. А. Кравченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.
6. Киричек, А. В. Ударное устройство для статико-импульсной деформационной обработки [Текст] /

А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2002. – № 10. – С. 35 - 40.

7. Киричек, А. В. Математическая модель ударного устройства для статико-импульсной обработки [Текст] / А. В. Киричек, А. Г. Лазуткин, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 8. – С. 17 - 22.

8. Киричек, А. В. Методы определения динамических характеристик генератора импульсов для статико-импульсной обработки [Текст] / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, Л. И. Биндас, Д. Е. Тарасов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2008. – №4-4. – С. 4 - 7.

Киричек Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК», г. Орёл
Д-р техн. наук, проф.
Директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова
Тел./факс: (4862)555524
E-mail: avk@ostu.ru

Соловьев Дмитрий Львович

Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром
Д-р техн. наук, проф. кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов»
Тел.: (49234)77145
E-mail: murstin@yandex.ru

Силантьев Сергей

Александрович
Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром
Канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов»
Тел.: (49234)77145
E-mail: box64@rambler.ru

A.V. KIRICHEK, D.L. SOLOVYEV, S.A. SILANTIEV

**ADAPTATION OF INDUSTRIAL HAMMERS
FOR DEFORMATION HARDENING OF MACHINE PARTS**

The considered possibilities of the using for hardening surface plastic deformation existing design striking device. Recommendations are given when adapting striking device with hydra- and electro drive.

Keywords: *hardening, surface plastic deformation, hydro hammer, electro hammer*

BIBLIOGRAPHY

1. Kirichek A.V. The Influence regimens static-impulse processing on uniformity hardening surface layer [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev, S.A. Silantiev // Blacksmith's-punching production. Processing metal by pressure. – 2004, № 2. – pp. 13-17.

2. Kirichek A.V. The Technological possibilities static-impulse processing [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev // Hardening and coating technologies. – 2006, № 8. – pp. 3-5.

3. Kirichek A.V. Loading material by wave to deformation when happening static-impulse processing [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev // Notify OrelGTU. Machine building. Instrument building. – 2003, № 3. – pp. 33-36.

4. Kirichek A.V. The Wave conditions of the shock system peg - shock peg at static-impulse processing [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev // Notify OrelGTU. Machine building. Instrument building. – 2004, № 4. – pp. 24-30.

5. Ushakov L.S. The hydraulic machines striking moving [Text] / L.S. Ushakov, U.E. Kotylev, V.A. Kravchenko // M.: Machine building. – 2000. – p. 416.

6. Kirichek A.V. The striking device for static-impulse deformation processing [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev, S.A. Silantiev // Blacksmith's-punching production. Processing metal by pressure. – 2002, № 10. – pp. 35-40.

7. Kirichek A.V. The mathematical model striking device for static-impulse processing [Text] / A.V. Kirichek, A.G. Lazutkin, D.L. Solovyev, S.A. Silantiev // Reference book. The engineering magazine. – 2003, № 8. – pp. 17-22.

8. Kirichek A.V. The methods of the determination of the dynamic characteristics impulse for static-impulse processing [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solovyev, L.I. Bindas, D.E. Tarasov // Notify OrelGTU. Machine building. Instrument building. – 2008, № 4-4. – pp. 4-7.

Kirichek Andrey Victorovich

FSBEI HVT «State University – ESPC»,
Orel
Dr. of Technical Sciences, Professor,
Director of Polikarpov TI
Phone (4862) 555524
E-mail: avk@ostu.ru

Solovyev Dmitry Lvovich

Doc. Sc. tech. Prof. of the department
"Computer aided design of the machines and technological processes"
Murom Institute (Branch of Vladimir State University), Murom
Phone: (49234)77145
E-mail: murstin@yandex.ru

Silantiev Sergey Aleksandrovich

Ph.D., assistant prof. of department
"Computer aided design of the machines and technological processes"
Murom Institute (Branch of Vladimir State University), Murom
Phone: (49234) 77145
E-mail: box64@rambler.ru

УДК 621.791.

Д.С. БЕЛИНИН, Ю.Д. ЩИЦЫН, П.С. КУЧЕВ, Н.Н. СТРУКОВ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НА ТОКЕ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ.

В данной статье рассмотрена возможность получения упрочненных слоев с уникальными характеристиками методом плазменной поверхностной закалки на токе обратной полярности. Описана сущность метода. Приведены микро- и макроструктуры упрочненного слоя и их описание и прочностные характеристики.

Ключевые слова: плазма, поверхностная закалка, твердость, обратная полярность.

Низкотемпературная плазма относится к концентрированным источникам энергии и находит все большее применение для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента из различных сплавов. При закалке концентрированными источниками энергии в силу высоких скоростей нагрева и охлаждения удается получить такую структуру и свойства поверхностного слоя, которые недостижимы при традиционных способах термической обработки.

Сущность плазменной закалки заключается в высокоскоростном локальном нагреве участка поверхности до высоких температур и последующим охлаждением со сверхкритической скоростью за счет теплоотвода во внутренние слои материала изделия. При этом формируется структура с высокими эксплуатационными характеристиками.

Основные преимущества плазменной закалки:

- локальность нагрева, упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина остается вязкой, что обуславливает повышенное сопротивление износу и усталости;
- высокая твердость и износостойкость упрочняемой поверхности;
- отсутствие или минимальные деформации упрочняемых деталей, что позволяет снизить трудоемкость механической обработки и затраты на изготовление деталей;
- при закалке без оплавления поверхности не требуется последующая механическая обработка (шлифовка), т.е. плазменную закалку можно использовать как финишную операцию;
- отсутствие необходимости применения охлаждающих среды и приспособления.
- возможность замены дефицитных высоколегированных сталей на низколегированные, упрочненные плазменной закалкой;
- возможность замены износостойких сталей на низкоуглеродистые с наплавленным рабочим слоем, упрочненным плазменной закалкой;
- возможность закалки локальных участков поверхности (кромки дисковых ножей, вырубных и гибочных штампов, зубьев пил, шин электро- и бензопил, места под манжеты, подшипники, прокатные валки и т.д.);
- возможность автоматизации процесса и включение закалочных установок в состав гибких производственных систем, автоматических линий.

По сравнению с лазерной закалкой плазменная имеет следующие преимущества:

- стоимость оборудования такой же мощности на порядок ниже;
- простота работы на установке и ее обслуживания;
- мобильность установки, возможность перемещения оборудования и быстрого монтажа на любом станке, обеспечивающем нужную скорость вращения детали или перемещения плазмотрона;
- не требуется наносить на поверхность специальные покрытия для увеличения поглощательной способности;
- высокий КПД, достигающий 85 %;
- возможность плавного регулирования в процессе закалки параметров режимов в широких пределах, т.е. изменения глубины, ширины, структуры и свойств закаленной зоны.

К недостаткам плазменной закалки относятся:

- частичный отпуск в местах наложения закаленных полос;
- необходимость зачистки поверхности закаливаемых изделий от различных загрязнений;
- необходимость принудительного охлаждения изделий малого диаметра и малой толщины для получения высокой твердости поверхности.

Одним из путей устранения недостатков плазменной поверхностной закалки видится применение плазменной дуги прямого действия обратной полярности (рис. 1).

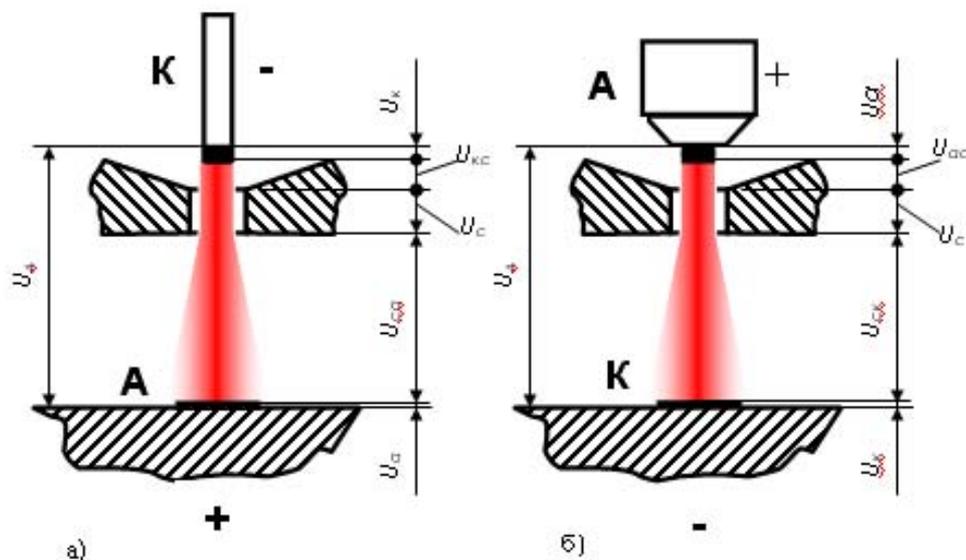


Рисунок 1 – Структурная модель плазменной дуги прямого действия: а – прямая полярность; б – обратная полярность).

Использование обратной полярности позволяет, за счет эффекта катодной очистки, проводить активацию поверхности. Также эффект катодной очистки позволяет значительно снизить требования к чистоте обрабатываемой поверхности (рис. 2). Широкие возможности регулирования мощности сжатой дуги и тепловложения в обрабатываемое изделие позволяют избежать необходимости принудительного охлаждения малогабаритных деталей и тонкостенных изделий.



Рисунок 2 – Внешний вид поверхности подвергнутой плазменной закалке на токе обратной полярности.

Накопленный опыт по практическому применению плазменного поверхностного упрочнения позволяет выделить следующие варианты:

- упрочнение без оплавления и с оплавлением поверхности детали;
- упрочнение с зазором между упрочненными зонами (ЗТВ), без перекрытия ЗТВ и с перекрытием ЗТВ;
- химико-термическая плазменная обработка;
- упрочнение в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки.

Технологические параметры процесса плазменной поверхностной закалки включают в себя величину и полярность тока дуги, скорость вращения изделия (скорость перемещения плазмотрона), расход плазмообразующего и защитного газа.

Обработка без оплавления как правило не меняет параметров шероховатости обрабатываемой поверхности и является финишной. Вариант же с оплавлением поверхности применяется в случае необходимости получения более глубоких, нежели без оплавления, упрочненных слоев.

В данной работе исследовали особенности плазменной поверхностной закалки на токе обратной полярности изделия из стали мартенситного класса 15Х5М с толщиной стенки 5 мм.

Плазменная закалка осуществляется путем сканирования сжатой дуги или плазменной струи по поверхности изделия (рис. 2).

Исследования проводились в двух вариантах:

1. Плазменная поверхностная закалка на токе обратной полярности без оплавления поверхности (рис. 3).
2. Плазменная поверхностная закалка на токе обратной полярности с оплавлением поверхности (рис. 4).

При внешнем осмотре образцов установлено:

- ширина упрочненной зоны образца обработанного по варианту №1 порядка 15 – 20 мм.; изменение рельефа поверхности не происходит, поверхность разных оттенков светло-серого цвета, изменение цвета наблюдается в виде неравномерной пятнистости
- ширина упрочненной зоны образца обработанного по варианту №2 порядка 20 - 22 мм.; рельеф поверхности изменен до небольшой шероховатости, по центру дорожки проходит полоса шириной примерно 5 мм со следами направленной кристаллизации и наличием небольшого усиления в районе начала шва. Поверхность дорожки серого цвета.

Для металлографического исследования данных образцов были приготовлены микрошлифы, при изготовлении и анализе которых использовалось следующее оборудование:

- микроскоп Axiovert 40 MAT
- заливочный пресс Leco PR-32
- шлифовальный станок SIS 1000

Травление полученных макрошлифов осуществлялось 4% раствором азотной кислоты в спирте. Вид макрошлифов исследуемых образцов представлен на рисунках 3 и 4.

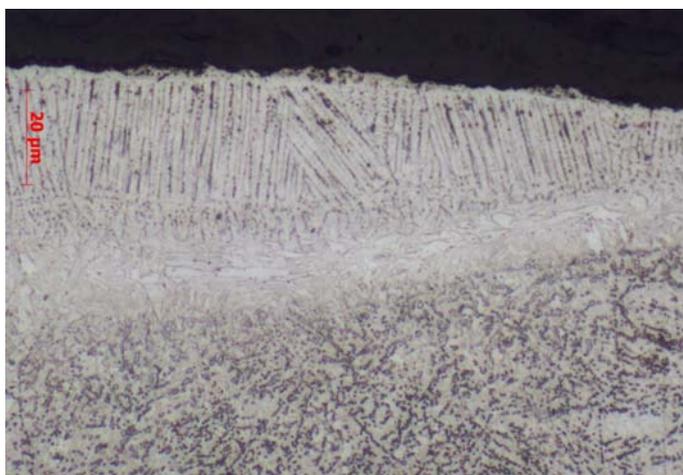


Рисунок 3 – Вид макро- и микроструктуры образца №1

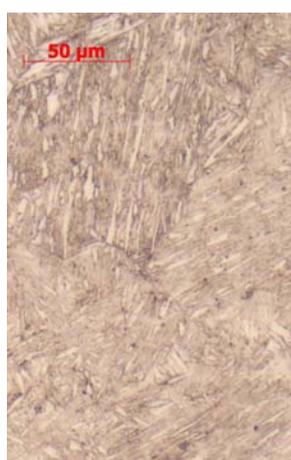
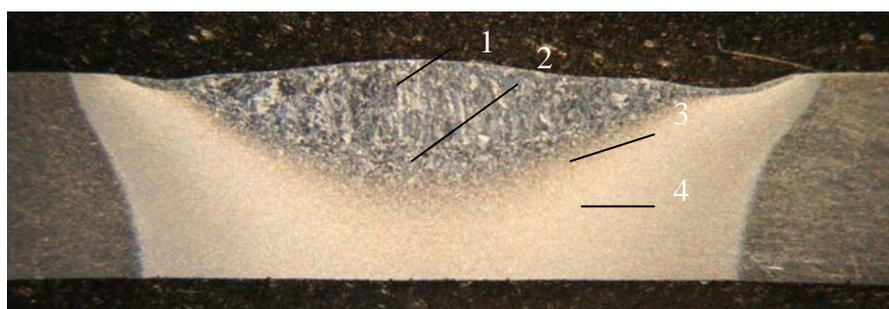
При просмотре макрошлифов под микроскопом было установлено, что на всех исследованных образцах имеются следы поверхностного нагрева, зоны нагрева различны по степени изменения структуры, ширине и глубине. Пор, раковин и плен на макрошлифах не обнаружено.

Результаты замера геометрических параметров зон приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические характеристики упрочненной зоны

№ обр.	глубина, мм	ширина обработанной зоны, мм
1	0,5	15 – 20
2	3,5	20 - 22

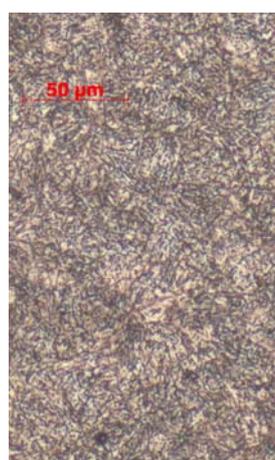
При анализе микроструктуры выявлено, что микроструктура упрочненного слоя образца №1 является структурой пластинчатого типа с равномерно распределенными отдельными зернами белой травимости (предположительно, феррита) (рис. 3). Остальная часть обработанной зоны представляет собой дисперсную феррито-карбидную смесь (предположительно, сорбит). Глубина обработанной зоны составляет 0,5 мм.



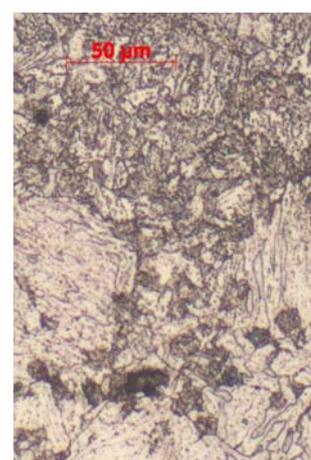
1



2



3



4

Рисунок 4– Вид макро- и микроструктуры образца №2.

Для образца №2: дорожка выполнена с расплавлением. Расплавленная ванна имеет значительно больший объем, чем на образце №1. В зоне расплавления структура мартенситного типа с пластинчатыми выделениями фазы белой травимости (феррита). В зоне термовлияния – феррито-карбидная смесь сорбитного типа.

Результаты замеров микротвердости закаленного слоя представлены в таблице 2

Таблица 2 – Микротвердость упрочненного слоя.

№ образца	микротвердость по зонам, $H_{\mu 50}$, кгс/мм ²			
	зона обработки/зона кристаллизации расплавленной ванны	ЗТВ вблизи границы сплавления	ЗТВ	основной материал
1	256...412	-	-	159...198
2	395...410	405...411	270...399	

Из анализа микротвердости закаленных слоев можно сделать вывод, что на всех образцах в зоне обработки значения твердости выше значений твердости основного материала. В случае с оплавлением поверхности в зоне кристаллизации расплавленной ванны значения твердости выше, чем в ЗТВ. В зоне термовлияния (структура на всех образцах представляет собой феррито-карбидную смесь сорбитного типа) по мере удаления от границы сплавления твердость плавно снижается.

Выводы:

1. Плазменная поверхностная закалка на токе обратной полярности может проводиться как в варианте с оплавлением, так и без оплавления поверхности и позволяет упрочнять как малогабаритные и тонкостенные изделия так и крупногабаритные конструкции в зависимости от требований к прочностным и геометрическим характеристикам упрочненного слоя.
2. Применение обратной полярности позволяет, при обработке без оплавления поверхности, достичь резкого изменения структуры приповерхностного слоя и получать тонкие упрочненные слои глубиной до 0.5 мм. Обработка с оплавлением поверхности позволяет достичь глубины упрочненного слоя более 3 мм.
3. В зависимости от варианта обработки значения твердости упрочненной зоны возрастают примерно в 1.5 – 2.5 раза по сравнению с основным материалом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лещинский, Л. К. Влияние технологии поверхностного упрочнения высококонцентрированным источником нагрева на структуру и трещиностойкость наплавленного металла и углеродистых сталей. [Текст] / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, Ю. И. Анисимов [и др.] // Свар. пр-во. – 1987. – № 5. – С. 3-5.
2. Лещинский, Л. К. Плазменное поверхностное упрочнение [Текст] / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч [и др.]. – Киев : Техника, 1990 – 109 с.
3. Физика и механика низкотемпературной плазмы [Текст] / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфрах, В. С. Клубникин. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с.
4. Быховский, Д. Г. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности. [Текст] / Д. Г. Быховский, В. М. Беляев // Автоматическая сварка. – 1971. – №5. – С. 27-30.

Белинин Дмитрий Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь
 Аспирант кафедры «Сварочное Производство и Технология Конструкционных Материалов»
 E-mail: 5ly@rambler.ru

D.S. BELININ, Y.D. SHICIN, P.S. KUCHEV, N.N. STRUKOV

TECHNOLOGICAL OPTIONS OF PLASMA SURFACE HARDENING ON REVERSE POLARITY.

The technology of reinforced layers with unique characteristics by means of plasma surface hardening on reverse polarity described in this paper. We describe the essence of the method. Shows the micro-and macro-hardened layer and the description and strength properties.

Keywords: plasma, surface hardening, hardness, reverse polarity.

BIBLIOGRAPHY

1. Leshchinsky L.K., Samotugin S.S., Pirch I.I., Anisimov I.Yu. at alii / Influence of surface strengthening technology with highly concentrated heating source upon structure and crack growth resistance of deposited metal and carbon steel. // Welding Engineering.- 5, pp. 3-5, 1987.
2. Leshchinsky L.K., Samotugin S.S., Pirch I.I. at alii. / Plasma Surface Strengthening. // Techniques, 1990.
3. Physics and Mechanics of Low-temperature Plasma / S.V. Dresvin, A.V. Donskoy, V.M. Goldfrab, V.S. Klubnikin. M.: Atomizdat, pp. 352, 1972.
4. Bykhovsky D.G., Belyaev V.M. Power properties of plasma arc at welding on reversed polarity. // Automatic Welding. № 5, pp. 27-30.

Dmitry Sergeevich Belinin

Post graduate student, Dep. of Welding Engineering and Constructional Materials Technology
Perm National Research Polytechnical University, Perm

УДК 621.923

А.В. ВОРОНКОВ, А.А. СИМАКОВ, О.А. ВАСИЛЕНКО, Ю.В. ВАСИЛЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ С ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЗАГОТОВКИ

Проведено экспериментальное исследование влияния технологических факторов на шероховатость обрабатываемой поверхности при плоском шлифовании периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки. Получены регрессионные уравнения, подтверждающие снижение шероховатости при обработке предложенным способом.

Ключевые слова: шлифование, шероховатость, осцилляция, эксперимент

На кафедре «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Госуниверситета – УНПК разработан способ плоского шлифования периферией круга с сообщением обрабатываемой заготовке поперечных колебаний заданной амплитуды и частоты. При способе плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки (ПОЗ), круг совершает вращательное движение со скоростью резания $V_{кр}$. В поперечном направлении со скоростью V_{nn} и в продольном направлении со скоростью V_{δ} осуществляется движение стола станка, на котором устанавливается обрабатываемая заготовка. Заготовке сообщаются поперечные колебания со скоростью $V_{ХА}$ (рис. 1).

Микрорельеф такой поверхности образуется как след движения абразивных элементов, контактирующих с обрабатываемой поверхностью. Поскольку этот след фактически полностью определяется кинематикой движения абразивных элементов и заготовки, создается новый изотропный микрорельеф с закономерно пересекающимися неровностями.

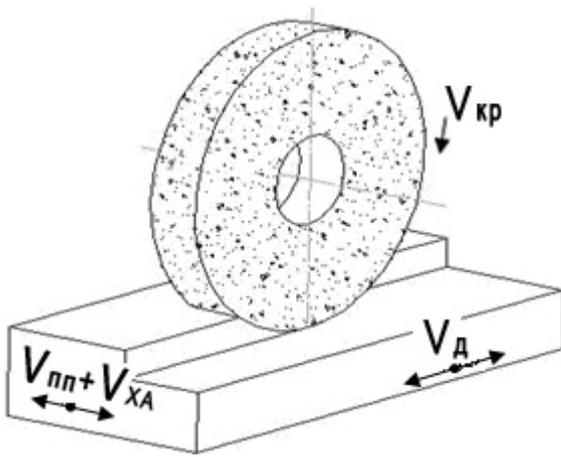


Рисунок 1 – Кинематическая схема процесса плоского шлифования с поперечной осцилляцией заготовки



Рисунок 2 – Топография обработанной поверхности предлагаемым способом (увеличено в 5000 раз)

Наложение на заготовку осцилляций обеспечивает участие большего числа зерен в процессе обработки, траектории движения которых увеличены и не эквидистантны, что приводит к образованию сетки разнонаправленных микронеровностей и увеличению металлоудаления.

Разработанные математические модели, описывающие данный способ шлифования, теоретически обосновывают повышение скорости съема металла до 76% и снижение шероховатости Ra обработанной поверхности до 42% по сравнению с традиционным шлифованием (рис. 2) [1]. Однако данные математические модели имеют допущения. Поэтому была поставлена цель провести экспериментальные исследования для проверки результатов проведенных теоретических исследований данного процесса.

Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования по определению влияния технологических факторов на шероховатость обрабатываемой поверхности при плоском шлифовании периферией круга с ПОЗ. Сущность данного экспериментального исследования сводится к получению регрессионных математических моделей для определения шероховатости обрабатываемой поверхности в продольном ($Ra_{ПП}$) и в поперечном ($Ra_{ПП}$) направлении, а также сравнению этих данных с рассчитанными по теоретической зависимости:

$$Ra = \frac{9 \cdot 10^{-2} l t k_{\xi}}{\sqrt{L_{\text{пл}}^2 - t^2}} \left(1 \pm V_{\ddot{a}} \left[(60V_{\dot{e}\delta})^2 + \left(\frac{3}{50} a \cdot f \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right) + \frac{9 \cdot 10^{-2}}{16} \left(1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_T} \right) \left[(2S_{\dot{y}\dot{y}} \pm S_x) + 0,5r \left(1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_T} \right) \right] + \frac{18 \cdot 10^{-2}}{n_i} \left(\frac{J_2 l_D^3 + J_1 l_D^2 L_D}{3EJ_1 J_2} + \frac{1}{j_i} \left[\left(\frac{l_p}{L_p} \right)^2 + \left(1 + \frac{l_p}{L_p} \right)^2 \right] \right) \sum_{i=0}^{n_i} P_{yi} \quad (1)$$

где l – расстояние между соседними абразивными зёрнами, находящимися на одном радиусе и лежащими в одной плоскости;

t – глубина шлифования;

k_{ξ} – коэффициент, учитывающий число выхаживаний;

$L_{\text{пл}}$ – длина дуги контакта абразивного зёрна с заготовкой;

$V_{\text{д}}$ – скорость продольного перемещения стола;

$V_{\text{кр}}$ – скорость вращения круга;

a – амплитуда колебаний;

f – частота сообщаемых колебаний;

τ_a – адгезионное взаимодействие инструмента и детали;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала;

S_{nn} – поперечное перемещение стола станка за время контакта единичного зерна с заготовкой;

S_x – осциллирующая подача детали вдоль оси X , за время поворота круга на величину угла контакта;

r – радиус скругления режущих зерен;

n_i – количество элементарных площадок на поверхности инструмента;

J_1 и J_2 – моменты инерции площади сечения участков ротора шпинделя станка;

l_p – расстояние между опорами шпинделя;

L_p – вылет переднего конца шпинделя;

E – модуль упругости материала шпинделя;

j_{II} – динамическая жесткость опор шпинделя;

P_{yi} – сила от единичного абразивного зерна.

Экспериментальные исследования проводились на плоскошлифовальном станке модели 3Е711ВФ1, с установленным на его шпинделе шлифовальным кругом марки ПП 250×40×76 4А40СМ19К 35м/с А 2 кл., в условиях лаборатории «Металлорежущие станки» ТИ Госуниверситета – УНПК.

Поперечная осцилляция заготовки осуществлялась разработанным на кафедре АСИС приспособлением (рис. 3).

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы из стали 45 и 40ХН, которые по очереди устанавливались на установку (рис. 3) и производилась их обработка на технологических режимах, согласно плану эксперимента. После каждой обработки образец снимался и очищался. Измерение шероховатости в продольном и в поперечном направлении производилось на профилографе-профилометре АБРИС – ПМ 7.2.

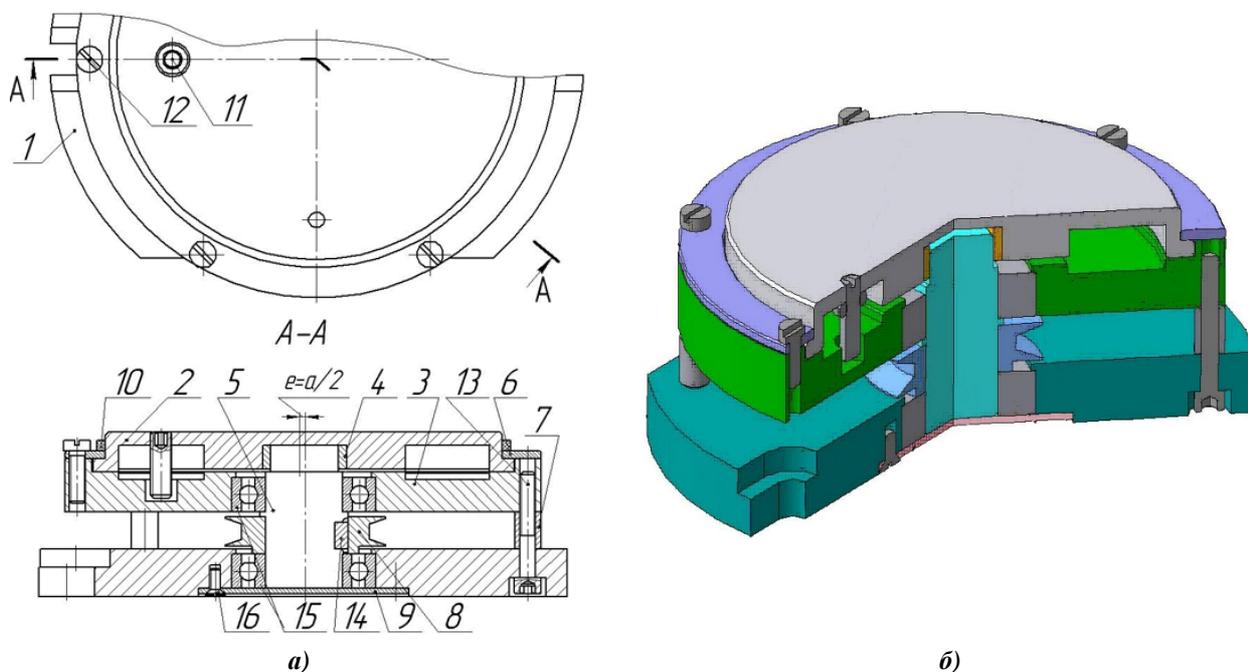


Рисунок 3 – Схема установки для реализации процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ (а) и ее трехмерная модель (б):

1 – основание; 2 – плита; 3 – корпус; 4 – сменная эксцентриковая втулка; 5 – вал; 6 – кольцо; 7 – ножки; 8 – шкив; 9 – крышка; 10 – резиновое защитное кольцо; 11 – иштифт; 12, 13, 16 – винты; 14 – шпонка; 15 – подшипники

Режимы шлифования выбирались на основании рекомендаций [2, 3] для обработки деталей данного типа и варьировались в следующих диапазонах: глубина шлифования $t = 0,002...0,01$ мм; скорость заготовки $V_d = 5...25$ м/мин (режимы окончательного шлифования [2]); количество выхаживаний $n = 1...10$; частота осцилляций $f = 25...85$ Гц; по результатам теоретических исследований установлено, что увеличение скорости съема металла наблюдается при частоте осцилляций более 25 Гц, в свою очередь верхнее значение частоты осцилляций ограничено возможностями установки. Амплитуда колебаний не изменялась и равнялась 0,6 мм, как максимально допустимая с точки зрения динамической устойчивости установки.

Планирование эксперимента для определения влияния технологических факторов на шероховатость обрабатываемой поверхности при однопроходной обработке проводили по полнофакторному плану 2^3 :

$$Ra_{ПР} = b_{0ПР} + b_{1ПР}X_1 + b_{2ПР}X_2 + b_{3ПР}X_3 + b_{12ПР}X_1X_2 + b_{13ПР}X_1X_3 + b_{23ПР}X_2X_3 + b_{123ПР}X_1X_2X_3 \quad (2)$$

$$Ra_{ПП} = b_{0ПП} + b_{1ПП}X_1 + b_{2ПП}X_2 + b_{3ПП}X_3 + b_{12ПП}X_1X_2 + b_{13ПП}X_1X_3 + b_{23ПП}X_2X_3 + b_{123ПП}X_1X_2X_3 \quad (3)$$

где $X_1; X_2; X_3$ – варьируемые факторы;

$b_{0ПР}...b_{123ПР}$ и $b_{0ПП}...b_{123ПП}$ – коэффициенты уравнений регрессии.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие уравнения регрессии:

1. Уравнения регрессии влияния технологических факторов на продольную шероховатость обработанной поверхности $Ra_{ПР}$:

- для стали 45:

$$Ra_{ПР} = 0,3937 - 10,3539 \cdot t - 0,0257 \cdot f - 0,0082 \cdot V_d + 0,2487 \cdot f \cdot t + 2,7571 \cdot t \cdot V_d - 0,0293 \cdot f \cdot t \cdot V_d \quad (4)$$

- для стали 40ХН:

$$Ra_{ПР} = 0,6466 - 18,3856 \cdot t - 0,0442 \cdot f - 0,0141 \cdot V_d + 0,4561 \cdot f \cdot t + 4,6211 \cdot t \cdot V_d - 0,0519 \cdot f \cdot t \cdot V_d \quad (5)$$

2. Уравнения регрессии влияния технологических факторов на поперечную шероховатость обработанной поверхности $Ra_{ПП}$:

- для стали 45:

$$Ra_{ПП} = 0,4737 + 41,6640 \cdot t + 0,0675 \cdot f + 0,00849 \cdot V_d - 0,3763 \cdot f \cdot t - 1,3078 \cdot f \cdot V_d - 0,0135 \cdot V_{ocu} \cdot t \cdot V_d \quad (6)$$

- для стали 40ХН:

$$Ra_{ПП} = 0,7256 + 21,8266 \cdot t + 0,0134 \cdot f + 0,0102 \cdot V_d - 0,1415 \cdot f \cdot t - 0,7625 \cdot f \cdot V_d - 0,0097 \cdot V_{ocu} \cdot t \cdot V_d \quad (7)$$

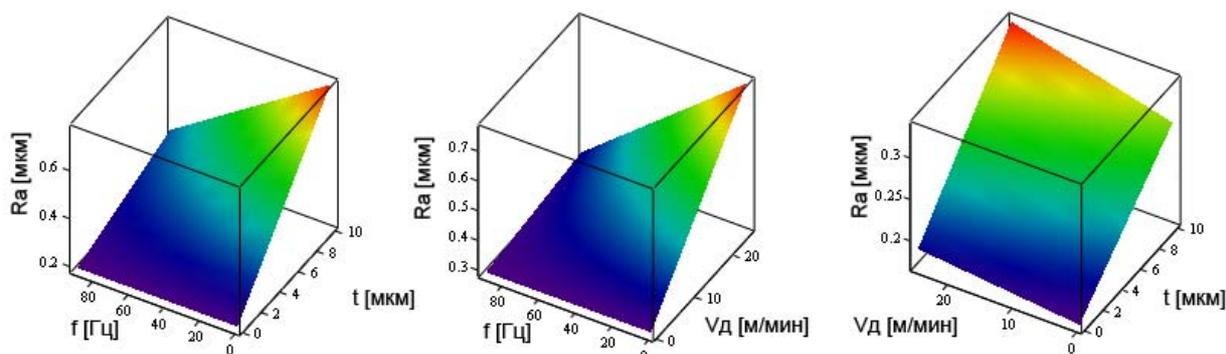
Из анализа графиков (рисунки 4 – 5) видно, что, при повышении частоты осцилляций f шероховатость обработанной поверхности снижается. При увеличении глубины шлифования t и скорости заготовки V_d шероховатость обработанной поверхности в продольном направлении увеличивается. Напротив, уменьшение шероховатости в поперечном направлении наблюдается при увеличении скорости заготовки V_d .

На основании зависимостей (4) – (7) получим формулу для определения средней шероховатости поверхности $Ra_{СР}$:

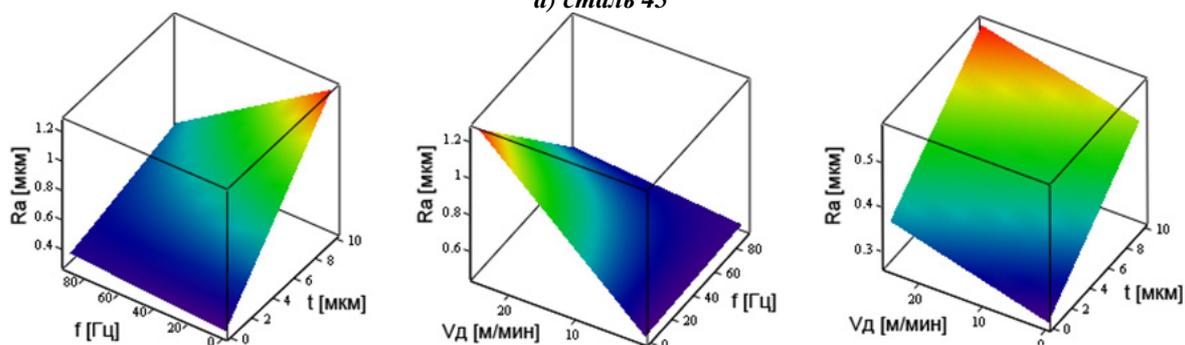
$$Ra_{СР} = 0,5 \cdot (Ra_{ПР} + Ra_{ПП}) \quad (8)$$

Данные, полученные с помощью зависимости (8), хорошо соотносятся с данными рассчитанными по формуле (1), расхождение не превышает 18%, что является приемлемым, учитывая стохастичность процесса шлифования.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что осцилляция зоны резания обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности как в продольном, так и в поперечном направлении. Так, при $f = 85$ Гц, $a = 0,6$ мм, $t = 0,01$ мм наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности по сравнению с маятниковым шлифованием периферией круга $Ra_{ПР}$ в 1,4 и $Ra_{ПП}$ в 1,45 раза.

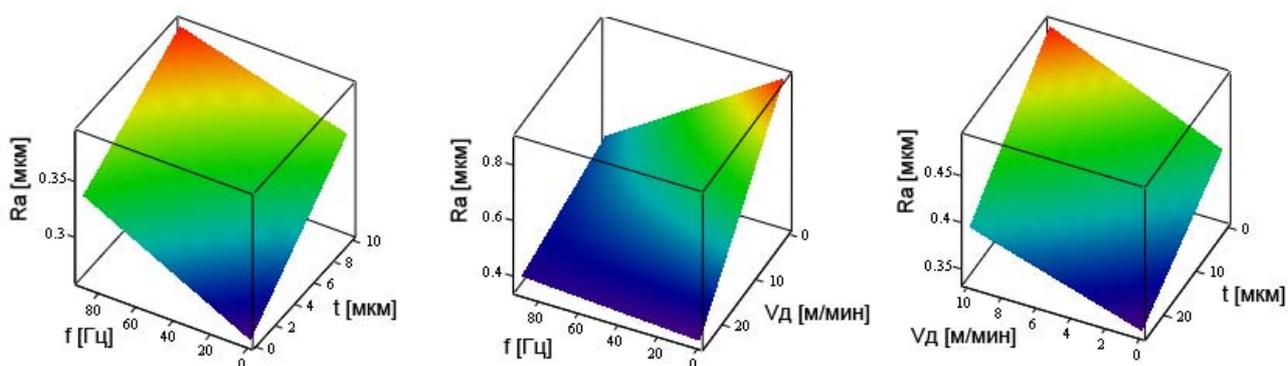


а) сталь 45

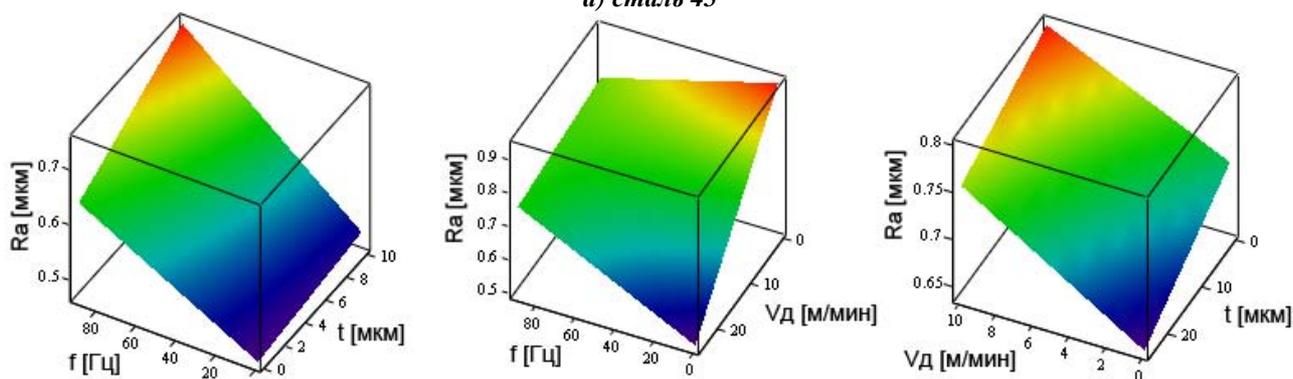


б) сталь 40ХН

Рисунок 4 – Влияние технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности в продольном направлении



а) сталь 45



б) сталь 40ХН

Рисунок 5 – Влияние технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности в поперечном направлении

При увеличении глубины шлифования более $0,015$ мм наблюдается увеличение шероховатости обработанной поверхности.

При скорости движения стола $V_d \leq 23$ м/мин и фиксированных $f = 90$ Гц, $a = 0,6$ мм, $t = 0,005...0,015$ мм, на обработанной поверхности формируется изотропный микрорельеф (разница между значениями шероховатости по параметру Ra в продольном и в поперечном направлении не превышает 5%), с углом скрещивания неровностей $\alpha < 1$ град.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков, А.В. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга путем поперечной осцилляции обрабатываемой заготовки [Текст] / А.В. Воронков. - Автореферат дис. канд. тех. наук: 05.02.08. – Орел, 2012. – 16 с..
2. Дальский, А. М. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. [Текст] / Под общ.ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение – 1, 2001. – 912с.: ил.
3. Филимонов, Л.Н. Высокоскоростное шлифование [Текст] / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. – 248 с., ил.

Воронков Александр Викторович
Преподаватель кафедры «Электротехнические дисциплины»
ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Тел: (4862) 54-14-19
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Симаков Александр Александрович
Аспирант
ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Тел: (4862) 54-14-19
E-mail: mactepnew@gmail.com

Василенко Ольга Аркадьевна
Магистр
ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Тел: (4862) 54-14-51
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Василенко Юрий Валерьевич
Канд. техн. наук, доцент, декан ТикТИ
ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Тел: (4862) 54-14-51
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

A.V. VORONKOV, A.A. SIMAKOV, O.A. VASILENKO, YU.V. VASILENKO

ROUGHNESS EXPERIMENTAL RESEARCH BY FLAT GRINDING WITH CROSS-SECTION OSCILLATION OF WORKPIECE

The experimental research of influence of technology parameters for the surface roughness at flat grinding by grinding wheel periphery with cross-section oscillation of workpiece. Regression equations, that confirm the roughness reduction with offered processing method, are received.

Keywords: grinding, roughness, oscillation, experiment

BIBLIOGRAPHY

1. Voronkov A.V. Increasing of efficiency of flat grinding by grinding wheel periphery via cross-section oscillation of workpiece. [Text] / A.V. Voronkov. – Abstract of Can. Sc. technical dissertation: 05.02.08. – Oryol, 2012. – 16 p..
2. Dalskiy A.M. Planner reference book. 2 volumes. [Text] / Edited by A.M. Dalskiy, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov, A.G. Suslov – 5-th publication. – М.: Mashchinostroenie – 1, 2001. – 912 p.: ill..
3. Filimonov L.N. High-speed grinding [Text] / L.N. Filimonov. – L.: Mashchinostroenie, Leningrad department, 1979. – 248 p., ill..

Voronkov Aleksandr Viktorovich
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Lecturer of dep. “Electrotechnical branch”
Phone: (4862) 54-14-51
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Simakov Aleksandr Aleksandrovich
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Post graduate student
Phone: +7-953-811-6536
E-mail: mactepnew@gmail.com

Vasilenko Olga Arkadieвна
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Master
Phone: (4862) 54-14-51
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

Vasilenko Yuriy Valerievich
Associate Prof., dean of the department «Mechanical engineering and design-engineering informatics»
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Phone: (4862) 54-14-51
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 664.65.05

С.В. ДЬЯЧЕНКО

ОПЫТ НОРМИРОВАНИЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ОТОПЛЕНИЕ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье представлена система нормирования расхода природного газа на отопление производственных зданий хлебопекарных предприятий. Это позволяет точнее прогнозировать расход природного газа, что благотворно отражается на экономическом положении предприятий.

Ключевые слова: удельные нормы, природный газ, прогноз потребления, отопление, хлебопекарные предприятия.

При составлении плановых калькуляций на выпускаемую продукцию хлебопекарные предприятия используют в своих расчетах квартальные удельные нормы расхода потребляемых ресурсов, в том числе и природного газа. Достоверность применяемых удельных норм расхода природного газа, представляющих собой прогноз потребления, напрямую влияет экономическое состояние предприятия. Поэтому нашей целью стало повышение точности прогнозируемого расхода природного газа.

На величину этих издержек влияет множество факторов, которые носят как закономерный, так и случайный характер. Наиболее простому прогнозированию поддаются закономерные факторы, имеющие сезонно-периодический характер. С целью выявления таких закономерностей отдельными предприятиями ОАО "Орелоблхлеб" были проведены работы по реконструкции газовых сетей, позволившие вести независимый учет расхода природного газа, направляемого на отопление.

Следующим этапом стало накопление подробных статистических данных о расходах тепловой энергии на отопление производственных зданий. В результате анализа полученных данных была выявлена нестрогая корреляция расхода тепловой энергии в ответ на изменения температуры наружного воздуха (рис. 1).

Известно, что суточные затраты тепловой энергии, необходимые для отопления здания, ориентировочно описываются следующим выражением [1]:

$$Q = Vq_0(t_g - t_n), \text{ ГДж/сут}; \quad (1)$$

где V – объем здания, м³;

q_0 – удельные затраты тепловой энергии на отопление 1 м³ здания, ГДж/(К·м³·сут);

t_g – средняя температура воздуха внутри здания, °С;

t_n – среднесуточная температура наружного воздуха, °С.

Неизвестную величину q_0 в выражении (1) можно вычислить, следующим образом:

$$q_0 = \frac{Q}{V(t_g - t_n)}, \text{ ГДж/(К·м}^3\text{·сут)}. \quad (2)$$

Значение величины q_0 зависит от теплотехнического состояния отапливаемого здания, а также от температуры наружного воздуха. Поэтому, на основании статистических данных по расходу тепловой энергии на отопление, были определены аппроксимирующие кривые.

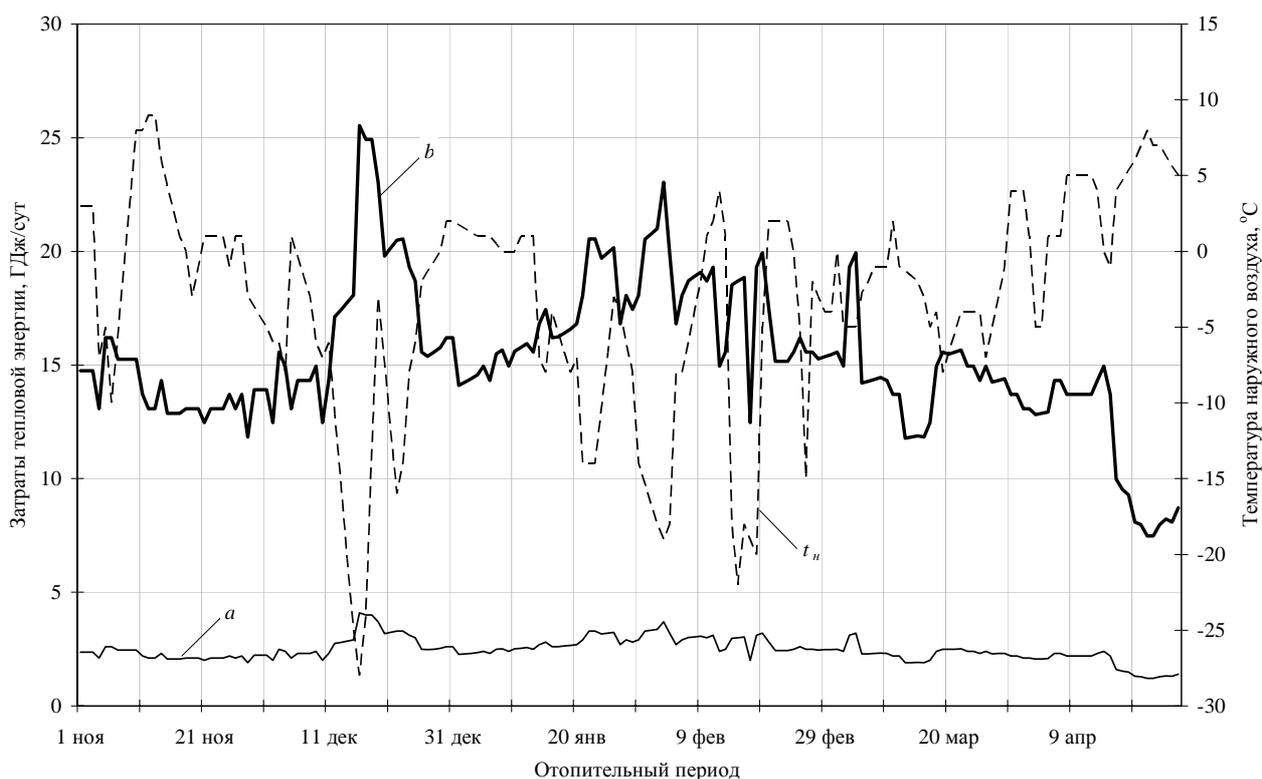


Рисунок 1 – Фактические суточные затраты тепловой энергии на отопление здания ОАО "Орелоблхлеб" (а) и корпуса ООО "Хлебокомбината "Юность" (б), а также график фактической температуры наружного воздуха (t_n)

Таблица 1 – Зависимость удельных затрат тепловой энергии q_0 на отопление производственных зданий от температуры наружного воздуха

Наименование здания	Объем здания, тыс.м ³	Уравнение аппроксимирующей кривой	Величина достоверности аппроксимации
Здание (а)	3,1	$q_{0,a} = -0,0001t_n^4 + 0,0053t_n^3 - 0,0582t_n^2 + 0,2108t_n + 26,269$	$R^2 = 0,945$
Здание (б)	46,0	$q_{0,b} = -7 \cdot 10^{-5}t_n^4 + 0,0031t_n^3 - 0,0323t_n^2 + 0,1093t_n + 11,068$	$R^2 = 0,9488$

Кроме того, были построены графические зависимости величин q_0 от температуры наружного воздуха для конкретных производственных зданий (рис. 2).

Кривая (b), описывающая удельные затраты тепловой энергии на отопление корпуса объемом 46 тыс.м³, имеет несколько более пологий характер, чем кривая (a), описывающая удельные затраты тепловой мощности на отопление корпуса гораздо меньшего объема 3,1 тыс.м³. При этом удельные затраты на отопление здания (a) больше, чем для более крупного корпуса (b), что можно объяснить меньшей тепловой инерцией меньшего по объему здания (a). Максимум величин q_0 находится вблизи температуры $t = 0$ °С, это можно объяснить:

- а) фазовым переходом для воды, при котором имеет место дополнительный расход тепловой энергии;
- б) метеорологическими факторами (дождь, ветер, туман), снижающими тепловое сопротивление зданий.

На основании полученных зависимостей удельных затрат q_0 тепловой энергии на отопление указанных зданий, а также с учетом прогнозируемых температур для конкретного периода отопительного сезона, появилась возможность более точного расчета по формуле (1) прогнозируемого расхода природного газа.

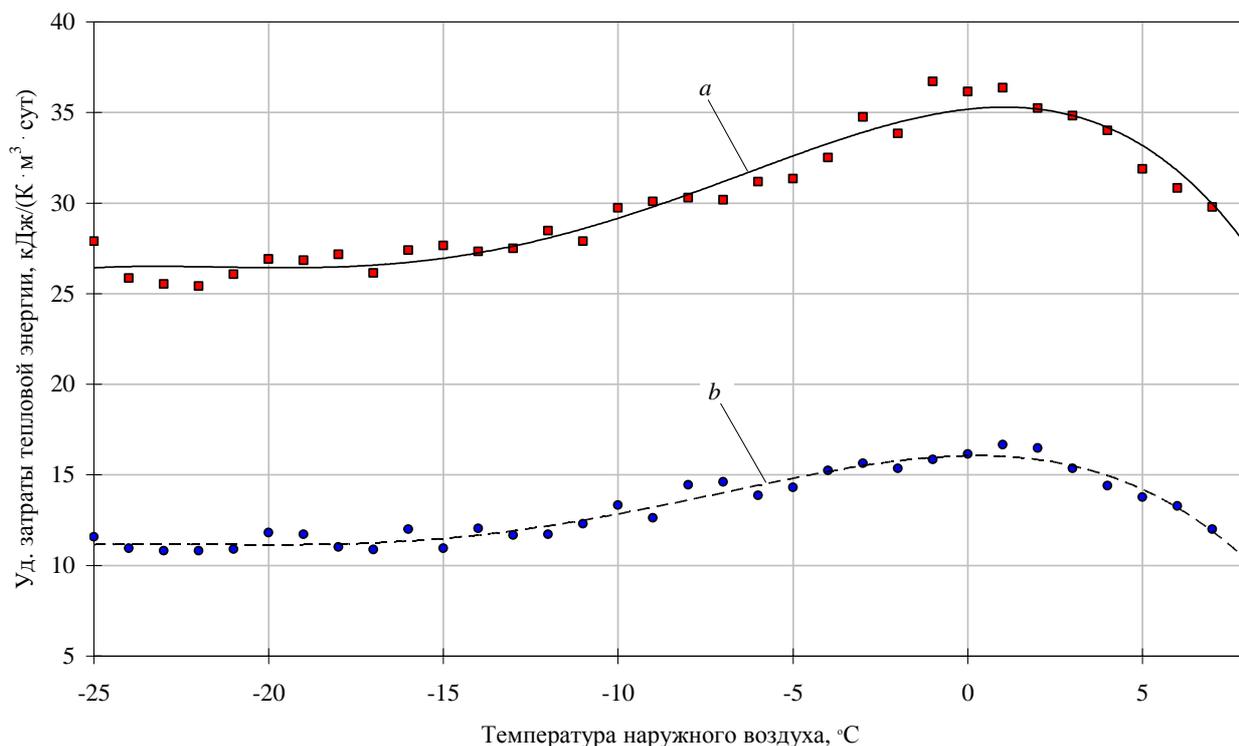


Рисунок 2 – Зависимость удельных затрат тепловой энергии на отопление административного корпуса ОАО "Орелоблхлеб" объемом 3,1 тыс.м³ (a) и производственного корпуса ООО "Хлебокомбината "Юность" объемом 46 тыс.м³ (b) от температуры наружного воздуха в отопительный период

Кроме того, сравнение величин q_0 различных зданий позволило выявить недостатки теплоизоляции отдельных цехов и принять меры по их устранению.

До внедрения данной методики погрешность в нормировании природного газа на отопление среднем по ОАО "Орелоблхлеб" составляла около 8-10 %, в настоящее время она не превышает 4-4,5 %. Это позволило работать без штрафных санкций за перерасход природного газа, а также снизить розничные цены на выпускаемую продукцию, что в конечном итоге повысило конкурентоспособность предприятий ОАО "Орелоблхлеб".

Предлагаемая система нормирования расхода природного газа на отопление производственных зданий опробована на практике и с успехом используется на предприятиях ОАО "Орелоблхлеб" уже более 7-ми отопительных периодов.

Но необходимо иметь в виду, что в случае проведения работ по теплоизоляции отапливаемого здания произойдет изменение величины q_0 , т.к. она является теплотехнической характеристикой конкретного здания. Это повлечет за собой необходимость обновления и повторной обработки статистических данных по затратам тепловой энергии для отопления этого здания. Кроме того, необходимо учитывать изменения режима работы теплоизлучающего технологического оборудования внутри здания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гатилин, Н. Ф. Проектирование хлебозаводов [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. Ф. Гатилин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1975. – 376 с.

Дьяченко Сергей Викторович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Канд. техн. наук, докторант кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»

Тел. (4862) 55 11 87; 8 953 625 76 29

E-mail: svdgrey@yandex.ru

S.V. DYACHENKO

EXPERIENCE RATIONING NATURAL GAS CONSUMPTION FOR HEATING BAKERIES

This article presents a system for standardizing the flow of natural gas for heating industrial buildings bakeries. This allows you to more accurately predict the consumption of natural gas, which have a beneficial effect on the economic situation of enterprises.

Keywords: unit standards, natural gas, forecast consumption, heating, bakery business.

BIBLIOGRAPHY

1. Gatilin, N. F. Development bakeries [text]: training. handbook for universities/ N. F. Gatilin. – the 5th edition, revised and supplemented. – M.: Food industry, 1975. – 376 p.

Dyachenko Sergej Viktorovich

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Candidate of technical science, doctoral degree of the department «Equipment and devices of food manufactures»

Тел. (4862) 55 11 87; 8 953 625 76 29

E-mail: svdgrey@yandex.ru

УДК 664.641.15:664.653.4:664.681

Н.П. САПРОНОВА, Е.А. МАКЕЕВ, Б.В. ШИШЕНОК, В.П. КОРЯЧКИН

ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕКЕРНОГО ТЕСТА И КАЧЕСТВА КРЕКЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУКУРУЗНОЙ МУКИ

В статье представлены результаты изучения влияния внесения кукурузной муки взамен пшеничной при производстве крекеров на реологические свойства теста и физико-химические показатели качества готовых изделий. Внесение кукурузной муки в тесто способствует улучшению качества крекеров.

Ключевые слова: кукурузная мука, вязкость, реологические характеристики, крекерное тесто.

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что у отдельных групп населения России имеются нарушения в питании, связанные, в том числе, с содержанием и соотношением основных питательных веществ и биологически активных компонентов: витаминов, эссенциальных жирных кислот и т.д., поэтому особенностью современного этапа развития пищевой промышленности является разработка качественно новых продуктов питания, дополнительно обогащенных физиологически функциональными ингредиентами, максимально соответствующих потребностям организма человека [1].

Крекер - мучное кондитерское изделие с высоким содержанием жира, отличающиеся слоистостью и хрупкостью.

В работе изучали влияние различных дозировок кукурузной муки на качество теста и готового крекера.

Кукурузная мука богата витаминами В1, В2, РР, кальцием, магнием, фосфором и железом, а также микроэлементами (медью и никелем), что позволяет рекомендовать изделия из кукурузы и кукурузной муки людям, имеющим аллергию, сахарный диабет, ожирение и другие формы нарушения обмена веществ, патологию желудочно-кишечного тракта [1].

Реометрию образцов теста, приготовленных по рецептуре крекера «Заказной», проводили на капиллярном вискозиметре с добавлением кукурузной муки с заменой муки пшеничной согласно рецептуре в количестве 10 %, 20 %, 30 %, 40 % и 50 % с использованием капилляра длиной 60 мм и диаметром 3 мм при комнатной температуре.

По результатам экспериментов исследования сдвигового течения крекерного теста были построены кривые течения – зависимости касательного напряжения θ от скорости сдвига D .

На рисунке 1 представлены кривые течения образцов крекерного теста, изображенные в логарифмических координатах.

Характер кривых течения исследованных образцов теста, изображенных в логарифмических координатах, позволил выбрать реологическое уравнение состояния для описания сдвигового течения крекерного теста [2]:

$$\theta = \frac{(\theta_0)^2}{\theta} + kD^n \quad (1)$$

где θ – касательное напряжение сдвига, Па;

θ_0 – предел текучести теста для соответствующих участков кривых течения, Па;

k – коэффициент консистенции, Па·с⁻ⁿ

D – скорость сдвига, с⁻¹;

n – индекс течения.

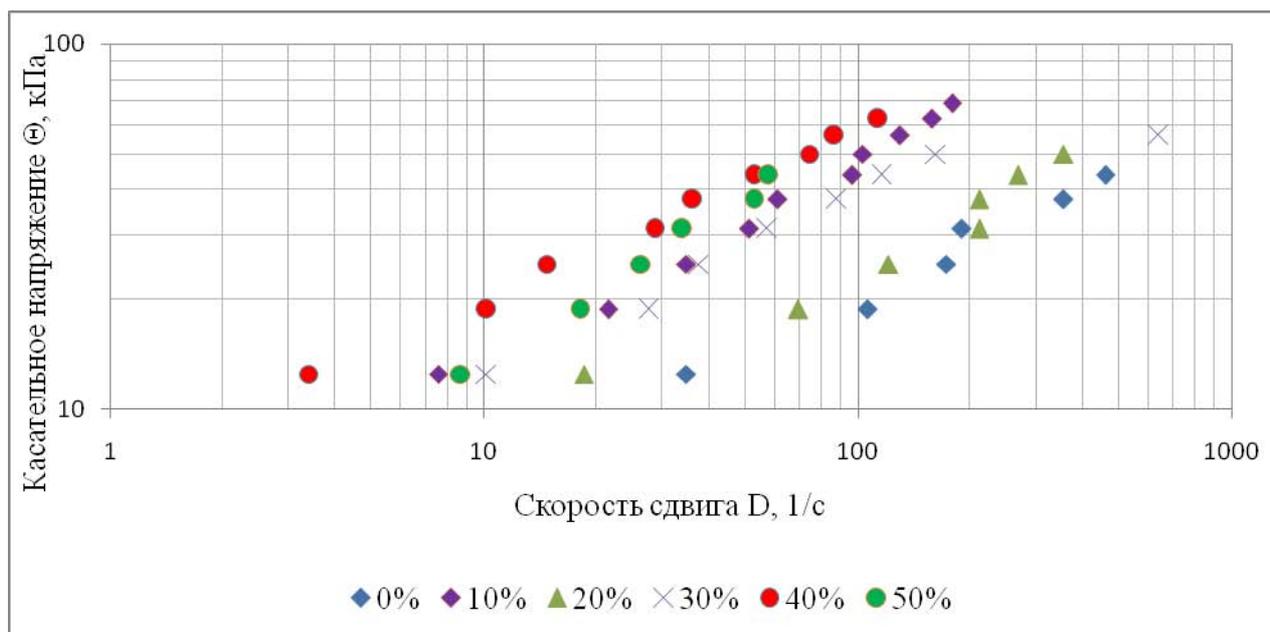


Рисунок 1 – Кривые течения образцов крекерного теста $\lg \theta = \lg \theta (\lg D)$ с внесением кукурузной муки в количестве: 10, 20, 30, 40 и 50 %

Математическая обработка результатов эксперимента, в частности кривых течения, позволила определить численные значения параметров их реологических уравнений [3].

В таблице 1 представлены численные значения параметров реологического уравнения состояния образцов крекерного теста с кукурузной мукой.

Таблица 1 – Реологические характеристики образцов крекерного теста с кукурузной мукой

Образцы крекерного теста с кукурузной мукой, %	Параметры реологического уравнения состояния $\theta = \frac{(\theta_0)^2}{\theta} + kD^n$		
	Предел текучести, θ_0	Коэффициент консистенции, k	Индекс течения, n
	кПа	Па·с ⁻¹	-
0	3,1	1,25	0,575
10	3,8	2,3	0,554
20	3,62	2,5	0,588
30	3,41	2,94	0,604
40	2,74	2,74	0,669
50	1,6	1,93	0,765

На рисунке 2 изображены графические зависимости изменения параметров реологического уравнения состояния крекерного теста в зависимости от содержания кукурузной муки.

Из представленных графических зависимостей параметров реологического уравнения состояния можно видеть, что на графиках в области содержания кукурузной муки С от 40 % до 50 % численные значения предела текучести θ_0 и коэффициента консистенции k крекерного теста приближены к соответствующим значениям контрольного образца при несколько увеличенном значении индекса течения n. Увеличенное значение индекса течения в сравнении с контрольным образцом указывает на повышение текучести крекерного теста с кукурузной мукой.

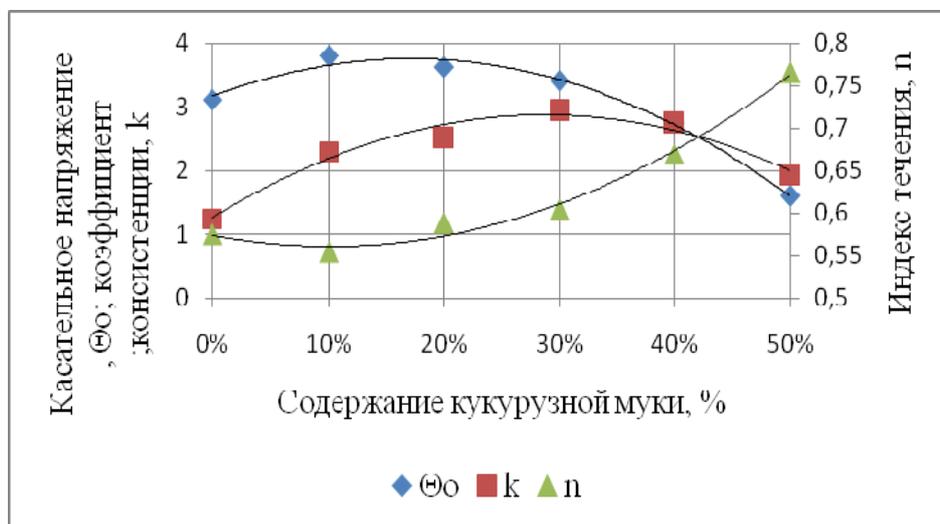


Рисунок 2 – Влияние содержания кукурузной муки на реологические характеристики крекерного теста

Контрольная выпечка образцов с содержанием 40 % и 50 % кукурузной муки показала, что данные образцы имели наилучшие качественные показатели по намокаемости, прочности, кислотности и выходу.

В таблице 2 приведены физико-химические показатели качества крекера с кукурузной мукой.

Таблица 2 – Качественные характеристики крекера с кукурузной мукой

Дозировка кукурузной муки, %	Массовая доля влаги теста, %	Массовая доля влаги в готовых изделиях, %	Кислотность, град.	Намокаемость, %	Прочность, Н	Выход, %
0	26	6	0,8	178	57,00	73,3
10	26	6,7	1,2	163,6	32,3	73,3
20	25,8	6,6	1,2	186,3	24	73,5
30	25,7	6,6	0,8	207,3	37,2	73,6
40	25,5	6,6	0,8	179,4	40,25	73,9
50	25,3	6,6	0,8	220,5	40,9	74,0

На рисунке 3 представлен график зависимости намокаемости образцов крекера от содержания в них кукурузной муки

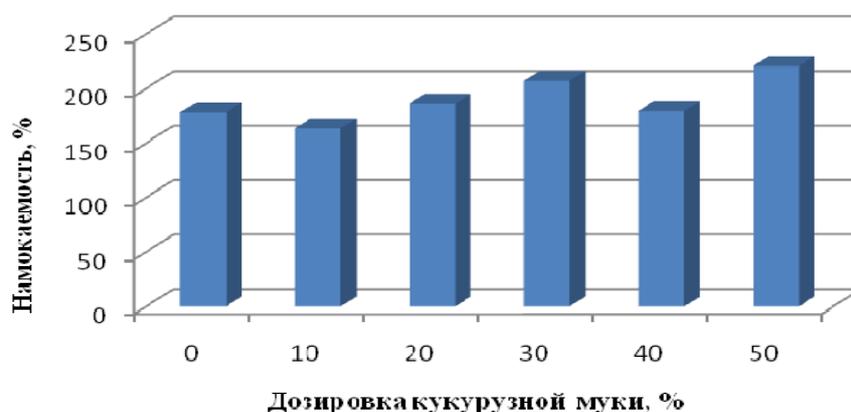


Рисунок 3 - График зависимости намокаемости крекера от дозировок кукурузной муки

Анализ полученных результатов показал, что намокаемость при дозировке кукурузной муки 10 % уменьшается на 8,01 %; при внесении 20, 30, 40 и 50 % увеличивается на 4,7; 16,4; 0,8 и 23,9 % соответственно.

На рисунке 4 представлен график зависимости прочности образцов крекера от содержания в них кукурузной муки

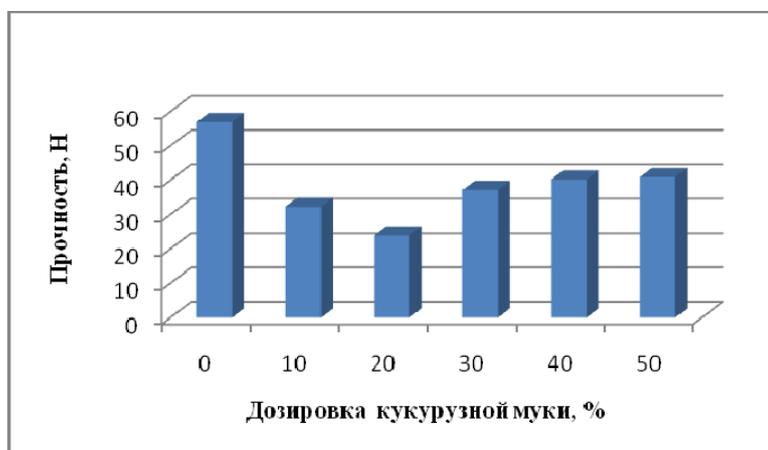


Рисунок 4 – График зависимости прочности крекера от дозировок кукурузной муки

Из графика видно, что происходит уменьшение прочности изделий. Так, при замене 10 и 20 % пшеничной муки кукурузной данный показатель уменьшается на 43,3 и 57,9 %; при замене 30, 40 и 50 % пшеничной муки кукурузной прочность уменьшается на 34,7; 29,4 и 28,2 % соответственно.



Рисунок 5 – Крекер с внесением 50 % кукурузной муки

Оптимальным выбран образец крекера с 50 % кукурузной муки. Образцы крекера с данной дозировкой обладают наиболее высокими физико – химическими показателями. Также они превосходят контрольный образец по органолептическим показателям – имеют приятный вкус, золотистый цвет, становятся более хрустящим.

Таким образом, рекомендуется внесение кукурузной муки взамен пшеничной в тесто для производства крекеров в количестве 50 %, что повышает качественные показатели готовой продукции, повышается пищевая ценность крекера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева, Т. В. Мучные кондитерские изделия функционального назначения. Научные основы, технологии, рецептуры [Текст] : монография / Т. В. Матвеева, С. Я. Корячкина. – Орел : Госуниверситет-УНПК, 2011. – 343 с.
2. Корячкин, В. П. Реология сырья, полуфабрикатов и заготовок изделий хлебопекарного, кондитерского и макаронного производств [Текст] / В. П. Корячкин. – Орел : ОрёлГТУ, 2006. – 40 с.
3. Реометрия пищевого сырья и продуктов [Текст] / Под ред. Ю.А. Мачихина. – М. : ВО Агропромиздат, 1990. – 189 с.

Сапронова Наталья Петровна

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Аспирант кафедры «Технология хлебопекарного, кондитерского и макаронного производства»
Тел. (4862) 55 11 87; 8 920 828 90 43
E-mail: natkasap888@mail.ru

Макеев Евгений Александрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Студент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»
Тел. (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Шишенок Борис Владимирович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Студент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»
Тел. (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Корячкин Владимир Петрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»
Тел. (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

N.P. SAPRONOVA, E.A. MAKEEV, B.V. SHISHENOK, V.P. KORYACHKIN

STUDYING OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF KREKERNOGO OF DOUGH AND QUALITY OF CRACKERS WITH USE OF THE CORN FLOUR

The paper presents the results of studying the influence of making corn flour instead of wheat in the manufacture of crackers on the rheological properties of dough and physico-chemical quality of finished products. The introduction of corn flour in the dough helps to improve the quality of crackers.

Keywords: corn flour, viscosity, rheology, dough for crackers.

BIBLIOGRAPHY

1. Matveeva, T.V. Flour functional purpose confectionery. Scientific bases, technologies, compoundings: the monography [Text] / T.V. Matveeva, S.Y. Korjachkina. - the Orel: FGOU VPO "State university-unpk", 2011. - 343с.
2. Koryachkin, V.P. Rheology of raw materials, semi-finished products and preparations of products of baking, confectionery and macaroni productions [Text] / V.P. Koryachkin. – the Orel: OrelGTU, 2006. – 40 p.
3. Rheometry of food raw materials and products [Text] / Ed. Y.A. Machikhina. - M: TO Agropromizdat, 1990. - 189 p.

Sapronova Natalya Petrovna

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Post-graduate student of the department of
«Technology of bread, confectionary and macaroni production»
Phone (4862) 55 11 87
E-mail: natkasap888@mail.ru

Makeev Evgeny Aleksandrovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Student of the department of «Cars and devices of food productions»
Phone (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Shishenok Boris Vladimirovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Student of the department of «Cars and devices of food productions»
Phone (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Koryachkin Vladimir Petrovitch

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Doctor of Engineering, professor, head of the department of «Cars and devices of food productions»
Phone (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

УДК 687.022

Е.Л. МОСЬКИНА, М.Ф. СЕЛЕМЕНЕВ, В.А. КОНДРАТЕНКО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ РАСКРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В Госуниверситете - УНПК ведется научная работа в области раскроя современных тканей с лайкрой с целью повышения качества выпускаемой продукции..

Ключевые слова: полиуретановые волокна, механический раскрой, амплитуда поперечных колебаний ножа, спекаемость настила, тепломассообмен.

Введение

Одним из перспективных направлений комплексной автоматизации процесса изготовления одежды является внедрение новых видов тканей, содержащих синтетические волокна, обладающих суперрастяжимостью, таких как лайкра. Такие ткани имеют актуальность в своем применении.

Мода неумолимо бежит вперед и параллельно развивается вместе с наукой, которая предлагает новые высокие технологии и ставит перед текстильной промышленностью очередные задачи. Стремление к индивидуальности, к личностному выражению, заставляет людей находится в постоянном поиске нового в одежде. Иногда это достигается цветовой гаммой и конструктивным членением, но в наше экономически нестабильное время большое внимание уделяется конкурентоспособности ткани, где важную роль играет структура нитей, фактура полотен их колористическое оформление и отделка. Ткани с содержанием лайкры обладают повышенной эластичностью, а изделия имеют отличную посадку, что не всегда достигается классическими способами конструирования.

Ведущие фирмы активно используют ткани, которые за счет применения полиуретановых нитей создают уникальные возможности для моделирования высококачественной одежды: изящной, пластичной, объемной, суперэлегантной, комфортной. Повышенная объемность и комфорт в движении таких тканей идеально подходят для спортивной, авангардной молодежной, повседневно-деловой и вечерней одежды. Способность растяжимых нитей обладать большим спектром заданных параметров (различной усадочностью, структурой поверхности, визуальными эффектами, способностью перерабатываться с разными волокнами) открывает неограниченные перспективы для мобильного реагирования на изменение моды.

Главными из общих требований, предъявляемыми к современной одежде, являются: - достаточно легкая растяжимость тканей и полотен, обеспечивающая свободу движений в относительно больших диапазонах изменения размеров тела человека; - высокая степень восстановления первоначальных размеров изделий после прекращения действия деформирующего усилия. Обеспечить эти требования возможно при использовании высокоэффективной технологии обработки пряжи.

Широкое применение тканей с содержанием лайкры накладывают свои требования при раскрое. Во-первых, при резании материалов под воздействием режущего инструмента, происходят упруго-пластические деформации, развивающиеся вплоть до отделения частиц (т.е. разрушения материала). Во-вторых, такие материалы обладают низкой термостойкостью. Процесс же резания сопровождается выделением значительного количества тепла, образуемого в результате деформации и трения по соприкасающимся поверхностям трущейся пары «инструмент-материал». В-третьих, возможность термической обработки и химическое происхождение современных синтетических материалов позволяет использовать более прогрессивные технологические процессы, заменив резание механическое химическим, физическим или другими процессами.

При разнообразном спектре методов раскроя, механический раскрой текстильных материалов имеет широкое применение из-за простоты изготовления режущего инструмента и осуществление процесса резания, возможности раскраивать одновременно большое количество полотен, и, главное, универсальности раскроя.

На точность деталей кроя оказывает влияние многочисленные факторы, к которым относятся: точность обводки лекал, способ настилки ткани, физико-механические свойства настилаемых тканей, различное положение деталей относительно направления нитей основы и утка и, вибрация, создаваемый раскройными ленточными машинами. Также, на точность кроя оказывает влияние натяжение ленточного ножа, скорость движения ножа, правильность его заточки, ширина ленточного ножа.

Во время работы раскройных ленточных машин наблюдаются поперечные колебания ножа. Амплитуда поперечных колебаний зависит от жесткости ножа при изгибе, скорости его движения, натяжения, наличия дополнительных точечных масс в местах соединения ленты, расстояний между опорными планками и роликами. Эти колебания также влияют на точность и качество кроя. В результате проведенных расчетов, получена зависимость для определения амплитуды поперечных колебаний ножа A в относительном движении, что позволило определить собственную погрешность кроя:

$$A = \frac{\sqrt{\frac{a^2}{l^2} z^2 w^4 + 4v^2 \frac{a^2}{l^2} w^2}}{\sqrt{\left[\left(\frac{T}{m_0} - v\right) \frac{\pi^2}{l^2} - w^2\right] \sin^2 \frac{\pi z}{l} + 4v^2 \frac{\pi^2}{l^2} w^2 \cos^2 \frac{\pi z}{l}}} \quad (1)$$

где A – амплитуда ленточного ножа;

a – амплитуда колебаний шкива;

w – частота кинематического возмущения.

a – ширина ножа (может составлять 10 - 20 мм),

b – толщина ножа, составляет 0,4 мм,

ρ – плотность материала, из которого изготовлен нож. Плотность стали У8А составляет 7,8 г/см³,

L – длина ножа составляет 3745 – 3900 мм, для расчета примем $L= 3814$ мм

v – скорость ножа, принятая 20 м/с,

T – натяжение ножа.

$$m_0 = \frac{M}{L}; \quad (M = abL\rho)$$

Установлено, что при раскрое на стационарной раскройной ленточной машине (СРЛМ) погрешность края, связанная с ножом складывается, в основном, из погрешности, возникающей в результате сгиба ножа заготовкой деталей и погрешности, вызванной периодическими поперечными колебаниями ножа, возникающими при недостаточной величине натяжения.

При проведении испытаний на СРЛМ при разрезании настиллов тканей из синтетических волокон происходит нагревание ножа, налипание на нож элементов деструкции материала, оплавление краев срезов деталей и слипание кромки среза деталей. Такое явление приводит к дополнительным затратам по отделению деталей из пачки, при этом края лохматятся, что создает трудности не только в последующих обработках детали, предусматривая дополнительные технологические операции, но и иногда детали перестают соответствовать своим размерам.

Для рассмотрения данного явления, был проведен теоретический анализ системы «нож - настил- окружающая среда» и выявлены основные направления снижения налипания полимера на нож при раскрое синтетических тканей с содержанием полиуретановых нитей. При рассмотрении данной системы учитывался принцип целостности системы, т.е. необходимо было рассмотреть систему «нож- настил - окружающая среда» во взаимосвязи его элементов друг с другом и учитывать возможное влияние каждого из компонентов системы на данное явление – налипание полимера на нож СРЛМ и спекание полотен в настиле.

Механика процесса резания включает в себя пластические и упругие деформации обрабатываемого материала, трение между обрабатываемым материалом и ножом СРЛМ, силы, натяжение, работу и т.д.

Теплота каждого источника теплообразования системы нож-настил- окружающая среда в результате резания представлена на рисунке 1.

Наибольший интерес представляет пластическая деформация обрабатываемого материала в процессе резания и сопровождающее резание тепловыделение как результат деформации обрабатываемого материала и трения на контактных поверхностях ножа СРЛМ.

Процесс теплообмена в зоне резания может быть описан двумя уравнениями.

Первое из них представляет собой уравнение теплового баланса:

$$\theta_0 = \theta_{a.i.} + \theta_{a.f.} + \theta_{o.f.} = \theta + \theta_f + \theta_a + \theta_{i\bar{n}}, \quad (2)$$

где $\theta_{д.м}$ - теплота, эквивалентная работе деформации срезаемого слоя, в том числе и работе в зоне образования деструкции;

$\theta_{д.н.}$ - теплота, эквивалентная работе трения на поверхности контакта « нож- деструкция»;

$\theta_{т.н.}$ – теплота, эквивалентная работе трения на поверхности контакта « нож- настил».

Расходная часть баланса содержит части θ , θ_n , θ_d и θ_{oc} , отображающие количества теплоты, передаваемой настилу, ножу, элементам деструкции ткани и окружающей среде.

Учитывая, что распространение тепла в зоне резания происходит в основном путем теплопроводности, то второе уравнение теплофизики резания имеет вид дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\tilde{N}_p \frac{d\theta}{dt} = \frac{\ddot{a}}{\ddot{a}\ddot{o}} \left[\lambda_o(\theta) \frac{\ddot{a}\theta}{\ddot{a}\ddot{o}} \right] + \frac{\ddot{a}}{\ddot{a}\ddot{o}} \left[\lambda_o(\theta) \frac{\ddot{a}\theta}{\ddot{a}\ddot{o}} \right] + \frac{\ddot{a}}{\ddot{a}\ddot{z}} \left[\lambda_y(\theta) \frac{\ddot{a}\theta}{\ddot{a}\ddot{z}} \right], \quad (3)$$

где θ - температура точки соприкосновения настила и ножа с координатами x, y, z ;

t - время, с;

λ - коэффициент теплопроводности

\tilde{N}_p - объемная теплопроводность тела.

Наибольшая часть теплоты выделяется за счет внутреннего трения частиц обрабатываемого материала (настила) при их перемещении под действием ленточного ножа ($\theta_{д.м.}$), за счет трения элементов деструкции ткани о передние режущие грани ножа ($\theta_{д.н.}$) и за счет трения задних и боковых граней ножа о поверхности обрабатываемого материала ($\theta_{т.н.}$).

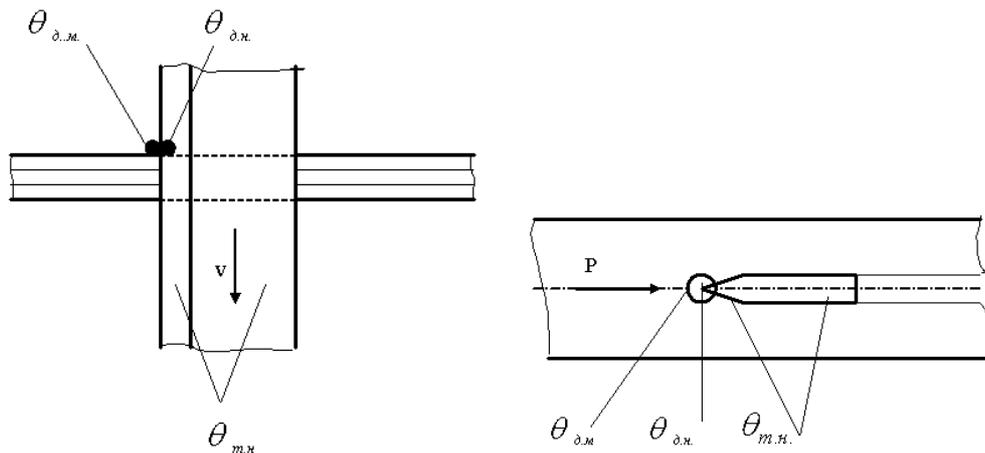


Рисунок 1 - Схема распределения теплоты резания в системе «нож-настил - окружающая среда»

Наибольшая часть теплоты резания, возникающая в элементах деструкции материала ($\theta_{д.м.}$), расходуется на ее плавление при раскрое синтетических тканей. Расплавленный полимер передает свою теплоту ленточному ножу, нагревая его, и охлаждаясь, налипает на нож. Часть теплоты резания ($\theta_{д.м.}$), идет на плавление разрезаемой ткани в области реза, что приводит к спеканию настила и только незначительная доля теплоты передается в окружающую среду лучеиспусканием и конвекцией. Такому распределению теплоты способствует малая теплопроводность обрабатываемого материала по сравнению с теплопроводностью ножа. Высокая теплопроводность металла способствует отводу тепла от режущей кромки, вследствие чего возрастает количество тепла, идущего на нагревание ножа. Тепло не распространяется вглубь материала, а концентрируясь на поверхности реза, вызывает оплавление кромки ткани).

С увеличением скорости резания возрастает как общее количество теплоты резания, так и доля теплоты, идущей на деструкцию и нож. Доля теплоты, распространяющейся в обрабатываемой детали будет уменьшаться.

Рассматривая законы распространение тепла в зоне резания, необходимо отыскать способы наиболее эффективного охлаждения инструмента и ликвидации спекания полотен в настиле.

Снизить налипание элементов деструкции полимера спекаемости полотен в настиле можно путем: уменьшения скорости резания или использование охлаждения подсистемы «нож-настил» в месте реза.

Уменьшение скорости резания, требует изменения конструкции СРЛМ в сторону ее усложнения (введение вариатора скорости) и ухудшает качество реза. Поэтому оптимальной скоростью ленточного ножа СРЛМ принята скорость, равная 20 м/с. Последний вариант по снижению налипания элементов деструкции не исключают возможности нахождения решения, не изменяя в главном конструкции СРЛМ.

Снижения налипания элементов деструкции материала на нож возможно применением, во-первых, смазочных агентов, которые уменьшают силу трения и понижают адгезию на контактирующих поверхностях ножа, элементов деструкции и настила. Введение смазывающего действия вызывает уменьшение тепловой мощности процесса и, соответственно, тепловыделение. В качестве смазывающего агента для смазки возможны следующие составы:

- глицериновое мыло;
- силиконовые жидкости;
- смесь глицерина с водой;
- смесь машинного масла с керосином;
- парафин.

Проведенный анализ показал нецелесообразность использования масел и «жирных» водных эмульсий вследствие быстрого засаливания шлифовальных кругов заточного механизма, использование керосина вызывает кожные заболевания и головные боли вследствие его токсичности. Необходимо также в водный раствор вводить антикоррозионную добавку. Введение в исследуемую подсистему нож-настил антиадгезионной смазки предусматривает разработку приспособлений для подачи смазочного вещества на нож непосредственно в момент раскроя, что также требует изменения конструкции СРЛМ. При применении смазки ножа наблюдается и положительные и отрицательные моменты:

- а) более легкое резание синтетических материалов;
- б) заточка ножа проводится реже;
- в) более легкое удаление с ножа элементов деструкции, налипших при использовании смазки в меньшем количестве;
- г) линия реза более гладкая, не имеет рваных краев, но полотна сплавлены;
- д) сход ленточного ножа со шкивов не наблюдался;
- е) по мере работы смазочного устройства войлочные пыжи, через которые подавалось смазка, забивается полимером, что затрудняет подачу необходимого количества смазки, что приводит к снижению эффекта;
- ж) войлочные пыжи не обеспечивают равномерности смачивания в результате отклонения ножа от первоначального вертикального положения под действием пакета ткани в процессе резания, особенно при вырезании по криволинейному контуру;
- з) смазка ножа не предотвращает полностью налипание элементов деструкции материала на нож, поэтому необходимо устройство для механического снятия полимера с ножа.

Недостатки, указывают на невозможность полного предотвращения налипания элементов деструкции материала и спекание полотен в настиле при резании ножом. Поэтому температуру в зоне резания можно значительно понизить, вводя в эту зону охлаждающие средства. Хороший эффект охлаждения дает охлаждение зоны резания углекислым газом, азотом или другими инертными газами. Однако их применение вредны для здоровья и загрязняют окружающую среду. Особое внимание на охлаждение ножа заслуживает применение сжатого воздуха, который подается централизованно в цех к рабочему месту и не требует серьезных изменений в конструкции СРЛМ.

Для повышения эффективности обработки применяются также методы, связанные с улучшением свойств инструментального материала, изменением состава и свойств поверхностного слоя инструмента, нанесением тонкопленочных покрытий, снижением шероховатости рабочих поверхностей и улучшение условий эксплуатации инструмента.

Вывод.

Увеличение выпуска востребованных моделей, облегчение работы пошивочных цехов непосредственно зависят от работы подготовительно-раскройного производства, а в частности от оборудования, применяемого при окончательном раскрое деталей изделий. Мероприятия, проводимые с целью совершенствования раскройного оборудования, объясняются высокими требованиями к качеству готовых изделий. Поэтому, систематизирование основных методов вырезания деталей кроя из настила и причин возникновения отклонений размеров кроя от номинальных величин является важной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базюк, Г. П. Резание и режущий инструмент в швейном производстве [Текст] / Г. П. Базюк. – М. : Легкая индустрия, 1980. – 187 с.
2. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний [Текст] : учебник для вузов / В. Л. Бидерман. – М. : Высш. школа, 1980. – 408 с.
3. Голубкова, В. Т. Подготовительно-раскройное производство швейных предприятий [Текст] : учеб. пособие / В. Т. Голубкова, Р. Н. Филимонова, М. А. Шайдоров [и др.]. – Минск : Высш. школа., 2002. – 206 с.
4. Светлицкий, В. А. Передачи с гибкой связью. Теория и расчет [Текст] / В. А. Светлицкий. – М. : Машиностроение, 1967. – 151 с.

Москина Елена Леонидовна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Канд. техн. наук, доцент
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Селеменев Михаил Федорович
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Канд. техн. наук, доцент
Тел.: (4862) 54-14-51

Кондратенко Виктория Александровна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Аспирант
E-mail: tikshi@ostu.ru

E.L. MOSKINA, M.F. SELEMENEV, V.A. KONDRATENKO

**THE PERFECTION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES
BY MODERNIZATION OF CUTOUT EQUIPMENT**

In State University scientific work on cutting of modern fabrics with lycra to improve the output quality is carried out.

Keywords: *polyurethane fibers, mechanical cutting, amplitude of cutter lateral oscillation, sintering ability of flooring, heat-mass exchange.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bazjukh G.P. Cutting and cutters in clothing manufacture. – M: Light industry, 1980. – 187 p.
2. Biderman V. L. The theory of mechanical fluctuations// Textbook for high schools. – M: High School, 1980. – 408 p.
3. Golubkova V. T, Filimonenkova R. N., Shajdorov M. A., etc. Preparatory cutout manufacturing of the sewing enterprises: Tutorial; – M.: High School., 2002. – 206 p.
4. Svetlitsky V.A. Loose interlinking gear / Theory and calculation. – M: Mechanical engineering, 1967. – 151 p.

Moskina Elena Leonidovna
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Candidate of technical science, the associate professor
Phone: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Selemeney Mihail Fedorovich
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Candidate of technical science, the associate professor
Phone: (4862) 54-14-51

Kondratenko Victoria Aleksandrovna
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
The post-graduate student
E-mail: tikshi@ostu.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 687.174:331.45: 621

Т.В. КВАСКОВА, Н.В. ШУЛЬДЕШОВА, Е.С. БАРКОВА

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЗАПУСКА МОДЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВО НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХИГОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Предложены методы расчета последовательности запуска моделей в производство на основе расчета технологической однородности моделей детских утепленных курток для мальчиков.

Ключевые слова: технологическая последовательность, неделимая операция, технологическая однородность, коэффициент технологичности, трудоемкость моделей, коэффициент однородности.

Для швейных предприятий различных форм собственности в современных рыночных условиях первостепенное значение приобретает вопрос успешной реализации выпускаемой продукции, что возможно только при широком ассортименте конкурентоспособной высококачественной продукции, произведенной на современном оборудовании.

Грамотно подобранное оборудование наиболее оптимально обеспечивает параметры соединения, скоростной режим, минимизацию ручного труда, техническое обеспечение качества выполняемой операции, уровень автоматизации и универсальность, что в свою очередь обеспечивает заданный уровень производительности и качества производимой продукции в целом, а также мобильность технологического процесса.

Эффективность использования двухигольных машин возможна в составе комплектов, куда входят взаимоувязанные по производительности швейные машины неавтоматического действия, швейные полуавтоматы, оборудование для влажно-тепловой обработки, транспортные средства

Однако практика показывает, что имеющееся в технологическом потоке двухигольное оборудование применяется при обработке лишь одной трети выпускаемой продукции. Такой парадокс возникает из-за недостаточного адресного проектирования моделей, т.е. не проработанности ассортимента с учетом имеющегося парка машин конкретно взятого технологического потока. В этой связи направлением совершенствования организационной подготовки производства швейных изделий в широком ассортименте, максимальное использование имеющегося в потоке оборудования является использование принципов технологической однородности моделей, которая обеспечивается благодаря однотипности методов обработки, однотипности используемого технологического оборудования и единству технологических последовательностей обработки для всех основных технологических операций процесса.

Подбор рациональной промышленной коллекции моделей обеспечивает с одной стороны выпуск изделий в широком ассортименте, а с другой – стабильность работы потока, что в свою очередь позволяет в условиях частой смены и обновления новых моделей допускать минимальные потери производительности труда.

Внедрение в производство современного оборудования автоматического действия, а также двухигольных машин со средствами малой механизации к ним, требует анализа технологичности конструкции модели. Для этого необходимо четкое установление показателей технологичности деталей и собираемой из них модели в целом. Такая оценка, в свою оче-

редь, позволит решить вопрос о возможной степени автоматизации технологического процесса, а так же установить какие показатели технологичности являются наиболее низкими, чтобы можно было наметить мероприятия по доработке конструкции модели, позволяющие усовершенствовать процесс изготовления.

Для проведения исследования был взят за основу технологический процесс изготовления детских утепленных курток для мальчика швейного предприятия ООО «Эврика» г. Орла с целью более эффективного использования двухигольного оборудования с одной стороны, а с другой – существенно увеличить возможность концентрации технологических операций на отдельно взятом рабочем месте. Оборудование в технологическом потоке сформировано в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции, а также массы тканей и материалов, из которых изготавливается данный ассортимент. В этой связи были изучены свойства текстильных материалов, используемых для изготовления изделий, влияющих на стабильность работы оборудования.

Таковыми свойствами являются в первую очередь поверхностная плотность материала, предел прочности при изгибе, воздухопроницаемость, состояние опорной поверхности. Эти свойства в значительной мере обуславливают конструкцию исполнительных инструментов оборудования, что делает возможным применение на той или иной технологической операции.

Основной набор пакета утепленной куртки: материал верха (покровный материал); подкладка; утепляющая прокладка.

В качестве основного материала используется: плащевая смесовая ткань с водоотталкивающей пропиткой; подкладки – подкладочная ткань из вискозных нитей в основе и утке поверхностной плотностью 75 – 95 г/м²; утепляющей прокладки – текстильное полотно «синтепон». Исследования тканей по перечисленным показателям показали о возможности их использования на данном оборудовании.

Для оценки технологичности конструкции модели использовались следующие показатели: коэффициент технологичности, показатель технологичности отдельных деталей и общий показатель технологичности модели.

Показатель технологичности T_d отдельных деталей, входящих в обрабатываемый узел модели, представляет собой сумму коэффициентов технологичности по признакам, деленную на общее количество признаков:

$$T = \sum a^i_j / \sum q_i , \quad (1)$$

где a^i_j – коэффициент технологичности,

i – порядковый номер признака;

j – порядковый номер детали или сборочной операции

q_i – признак технологичности.

Общий показатель технологичности изделия $T_{Изд}$ представляет собой сумму показателей технологичности отдельных деталей изделия, деленную на общее количество деталей (или сборочных операций):

$$T_{Изд} = \sum T / n , \quad (2)$$

Коэффициент технологичности устанавливался от 0 до 1 через интервал, равный 0,1. Оценка производилась экспертным методом. В случае полного соответствия детали требованиям данного признака коэффициент равен 1, а в случае полного несоответствия условиям сборки на данном оборудовании - 0.

Оценка производилась следующим образом: деталь, которая хотя бы по одному из признаков технологичности имела нулевую оценку, не учитывалась; суммировались только коэффициенты технологичности деталей, не имеющие нулевой оценки, деленные на общее количество деталей, входящих в собираемое изделие.

Для укрупненного расчета технологичности изделия $T_{Изд}$ использована эмпирическая формула, согласно которой технологичность зависит от максимальной, минимальной и расчетной трудоемкости моделей:

$$T_{Изд} = 1 - (T_{max} - T_{min}) / (MT), \quad (3)$$

где T_{max} – максимальная трудоемкость модели,

T_{min} – минимальная трудоемкость модели,

M – количество моделей для которых определяется технологичность, шт.;

T – расчетная трудоемкость базовой модели, ч.

Количественная оценка технологической однородности моделей определялась путем сравнения операций каждой пары А-Б, А-В, Б-В моделей по коэффициенту однородности $K_{од}$, который рассчитывался по формуле

$$K_{од} = 2N_{m.од} / N_{m.общ}, \quad (4)$$

где $N_{m.од}$ - количество однородных технологически неделимых операций в технологической последовательности;

$N_{m.общ}$ – общее количество технологически неделимых операций.

На выбранные три модели детских демисезонных курток для мальчиков на действующем потоке (рис. 1, модели А, Б, В) были рассчитаны коэффициенты однородности (отношение времени операций совпадающих по методам обработки в модели-аналоге, ко времени на обработку основного изделия).

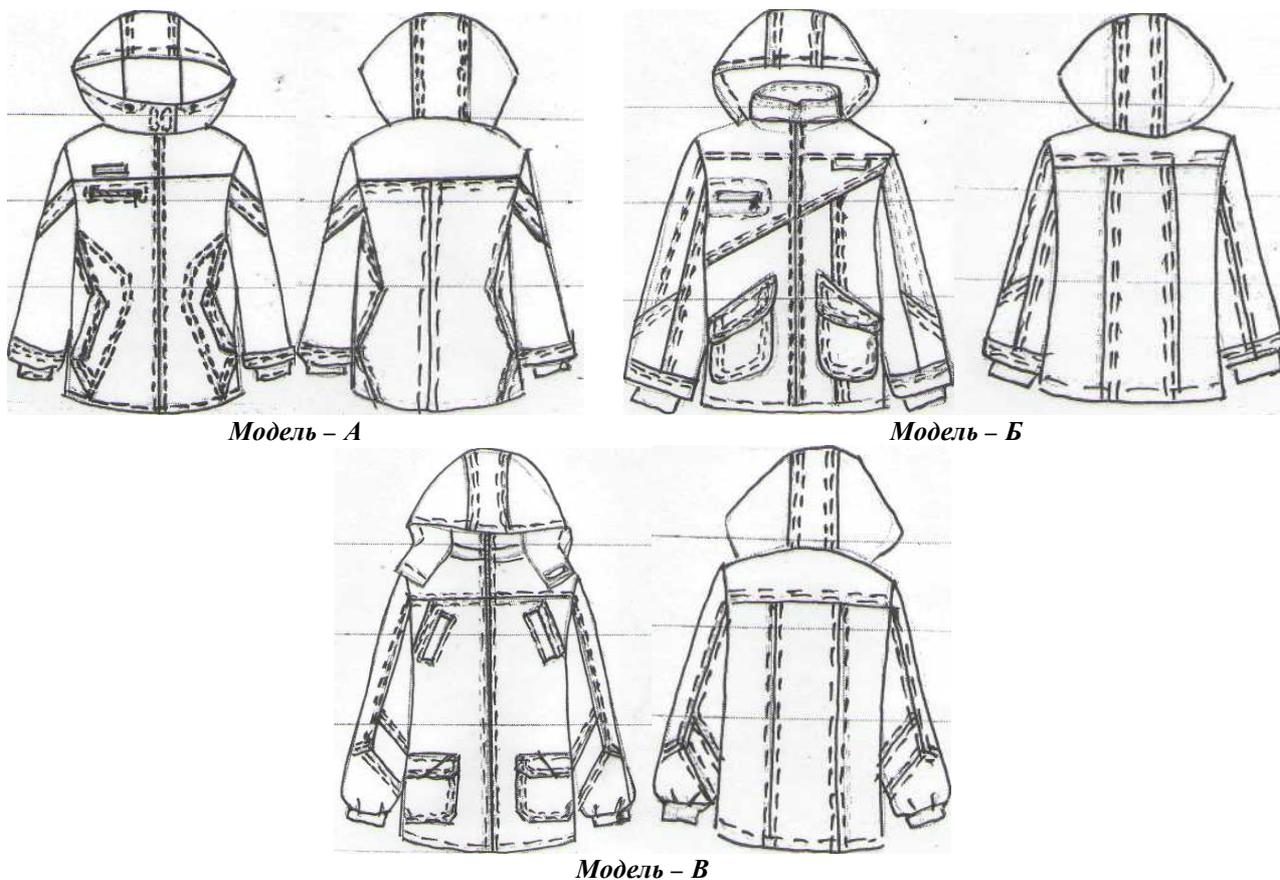


Рисунок 1 – Детские утепленные куртки для мальчиков

На модели А, Б, В были составлены технологические последовательности изготовления, являющиеся исходными данными для расчета.

При смене моделей на потоке с использованием двухгольного оборудования, в целях обеспечения наименьших потерь объемов производства рекомендуется устанавливать оптимальную последовательность запуска с учетом технологической однородности.

Решение этой задачи включает в себя три этапа: оценку технологической однородности путем попарного сравнения технологической однородности запланированных к запуску моделей; составление матрицы коэффициентов однородности моделей; определение оптимальной последовательности запуска моделей, при которой общее количество перестроек сводится к минимуму.

Если коэффициент однородности $K_{од} < 0,5$ модели считаются неоднородными и в этом случае необходимо внести определенные изменения в конструкцию модели, которые не нарушали бы замысла дизайнера и в то же самое время отвечали бы требованиям однородности.

В качестве примера рассмотрим первую пару моделей А и Б. В выбранных моделях технологическая последовательность содержит технологически неделимых операций: для модели А – 275; Б – 305. Количество однородных технологически неделимых операций по технологическим последовательностям обработки этих двух моделей равно 180. Полученные данные подставляем в формулу 4 и рассчитываем значение коэффициента однородности пары:

$$K_{од\ А-Б} = 2 \frac{180}{275 + 305} = 0,622$$

Аналогично были рассчитаны коэффициенты однородности двух других пар моделей. Результаты приведены в матрице коэффициентов однородности выбранных трех пар моделей (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица коэффициентов однородности моделей детской утепленной куртки для мальчиков

Обозначение модели	А	Б	В
А	1	0,622	0,634
Б	-	1	0,809
В	-	-	1

При попарном сравнении моделей А-Б, А-В, Б-В были получены соответствующие коэффициенты однородности: 0,622; 0,634; 0,809.

Диапазон коэффициентов технологической однородности составил 0,6 – 0,8. По данным ЦНИИШП (Центрального научно – исследовательского института швейной промышленности) это средний (II) уровень технологической однородности, что предполагает освоение около 20 % новых операций и частичную перестройку потока. Близость значений технологической однородности моделей обеспечивает сокращение потерь объемов производства на 2 – 4%.

На основании полученных результатов коэффициентов однородности и из анализа матрицы (табл. 1) представляется возможным проследить порядок запуска рассматриваемых моделей в производство с учетом разработки технологических схем формирования полуфабриката на двухигольных машинах с целью сокращения потерь объемов производства. Порядок запуска с учетом коэффициентов однородности показал, что при запуске моделей Б – В – А будет оптимальным и потери на освоение технологических приемов будут минимальными. Коэффициент однородности модели А ближе к коэффициенту однородности модели В.

Таким образом, установлена оптимальная последовательность запуска рассматриваемых моделей в производство с учетом разработки технологических схем формирования полуфабриката на двухигольных машинах, которая обеспечивает непрерывность протекания технологического процесса при минимальных временных и качественных потерях. Эта последовательность характеризуется цепочкой запуска Б – В – А.

Зависимость потерь от степени однородности моделей и величина образующих при этом потерь определяется графически (рис. 2).

На графике *a*, построенном без учета технологической однородности моделей, установлены потери объемов производства благодаря смещению коэффициентов однородности, т.е. неоднородности моделей. Условные потери складываются из отдельных смещений коэффициентов однородности, установленных между смежными моделями и показанных на рисунке штриховыми линиями.

На графике *б*, построенном с учетом технологической однородности, условные потери меньше, чем на графике *a*.

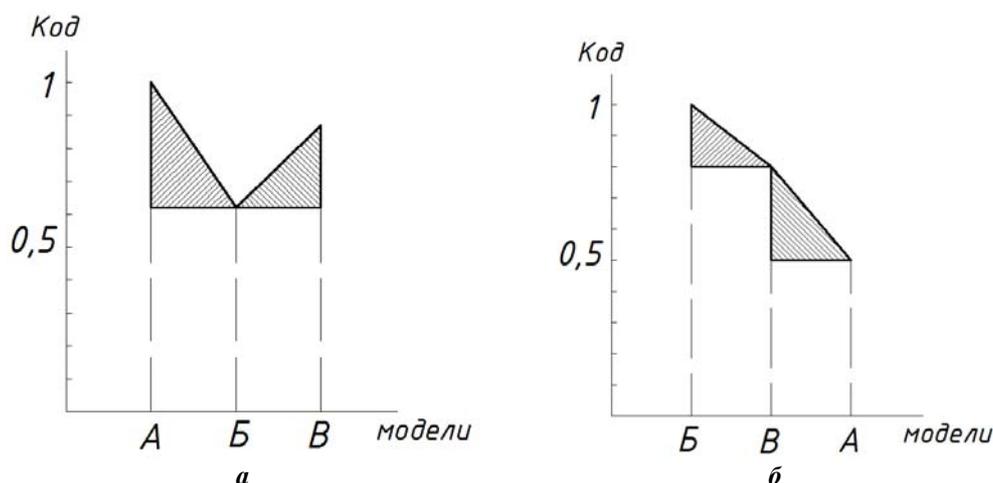


Рисунок 2 - График запуска моделей:

а - без учета технологической однородности моделей; б - с учетом технологической однородности моделей

Из полученных результатов сделаны следующие выводы:

- потери на освоение моделей взаимосвязаны с технологической однородностью моделей;
- чем выше коэффициент однородности моделей, тем меньше потери на освоение моделей и выше качество изготовления;
- модели с низким коэффициентом однородности нарушают непрерывность технологического процесса изготовления швейного изделия, кроме того, вызывают перестройку потока, а, следовательно, потери рабочего времени.

Исходя из изложенного выше, можно предположить, что для сокращения потерь освоения новых моделей, возникающих в момент их смены, рекомендуется предварительно (по эскизам и технологическим последовательностям) устанавливать степень технологической однородности моделей, подготавливаемых для изготовления в потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокеткин, П. П. Справочник по организации труда и производства на швейном предприятии [Текст] / П. П. Кокеткин, Ю. А. Доможиров, И. Г. Никитин. – М. : Легпробитмиздат, 1985. – 312 с., ил.
2. Швейное оборудование – проблема выбора для мелких производств [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://www.shveymash.ru/articles/shveyное_oborudovanie__problema_vybora_dlya_malykh_proizvodstv.html
3. Доможиров, Ю. А. Особенности формирования коллекции моделей и запуск их в производство [Текст] / Ю. А. Доможиров, Е. В. Котелева. – М. : Легпромбытиздат, 1988. – 39 с.
4. Ганулич, А. А. Совершенствование технологии изготовления одежды за счет применения современного швейного оборудования [Электронный ресурс] / А. А. Ганулич. – Режим доступа: http://www.shveymash.ru/articles/sovershenstvovanie_tekhnologii_izgotovleniya_odezhdy_za_schet_primeneniya_sovremennogo_shveyного_oborudovaniya.html
5. Швейное оборудование – проблема выбора для мелких производств [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://www.shveymash.ru/articles/shveyное_oborudovanie__problema_vybora_dlya_malykh_proizvodstv.html

Кваскова Тамара Викторовна

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
 Канд. техн. наук, доцент
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: tikshi@ostu.ru

Шульдешова Наталья Викторовна

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
 Магистрант кафедры ТиКШИ
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: tikshi@ostu.ru

Баркова Елена Сергеевна

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Магистрант кафедры ТиКШИ

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

T.V. KVASKOVA, N.V. SHULDESHOVA., E.S. BARKOVA

OPTIMIZATION OF CALCULATION AND SEQUENCE OF LAUNCHING MODELS IN PRODUCTION ON THE BASIS OF TECHNOLOGICAL UNIFORMITY USING THE TWO – NEEDLE EQUIPMENT

In this article are offered the methods of calculation and sequence of launching models in production on the basis of technological uniformity using the two-needle equipment.

Keywords: *technology, sequence, indivisible operation, technological uniformity, technological factor, labour-intensity of models, factor of uniformity*

BIBLIOGRAPHY

1. Koketkin P.P., Domozhirev Yu.A., Nikitin I.G. Handbook on Labour Management and Manufacturing at Clothing Manufacture.-M.: Legprombytizdat, pp.312, ill., 1985.
2. Sewing Equipment – Problem of Choice for Small Business. http://www.shveymash.ru/articles/shveyhoe_oborudovanie_problema_vybora_dlya_malykh_proizvodstv.html
3. Domozhirev Yu.A., Koteleva E.V. Peculiarities of samples collection formation and samples manufacturing application .Legprombytizdat, pp. 39, 1988.
4. Ganulich A.A. Technological development of clothing manufacturing technology at expense of modern sewing equipment. http://www.shveymash.ru/articles/sovershenstvovanie_tekhnologii_izgotovleniya_odezhdy_za_schet_primineniya_sovremennogo_shveyhnogo_oborudovaniya.html

Kvaskova Tamara Viktorovna

Polikarpov Technological Institute

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Can.Sc.tech., Assistant Professor

Phone: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

Shuldeshova Nataliya Viktorovna

Polikarpov Technological Institute

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Undergraduate

Phone: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

Barkova Elena Sergeevna

Polikarpov Technological Institute

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Undergraduate

Phone: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 620.179

П.П. БЕЛИКОВ, Л.И. ЛЕБЕДЕВА, А.А. ЛАРИЧЕВ

ПОЛУЧЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ СИЛЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ КОНТАКТНЫХ ПАР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В результате проведения определительных испытаний прямоугольных электрических соединителей получена эмпирическая формула силы сочленения для разъёма с произвольным количеством контактных пар. Эта формула позволяет оценить соответствие технологических возможностей предприятия требованиям заказчика к данному параметру.

***Ключевые слова:** технология; прямоугольный электрический соединитель; сила сочленения; определительные испытания; эмпирическая формула; контактная пара разъёма*

Постановка цели работы

Электрические соединители (разъёмы) являются частью любого электронного устройства. Они представляют собой сочетание электрических и механических деталей, испытывающих значительные нагрузки. Отказ разъёмов может привести к потере работоспособности всего изделия, и к показателям их надёжности предъявляются высокие требования.

Целью определительных испытаний являлось установление функциональной зависимости усилия сочленения соединителя от числа контактов (контактных пар). Результатом испытаний стала эмпирическая формула для расчёта силы сочленения прямоугольных электрических соединителей с произвольным (нестандартным) количеством контактов (контактных пар), которая предназначена для оценки соответствия технологических возможностей предприятия требованиям заказчиков. Объектом испытаний являлись прямоугольные электрические соединители типа СНП306.



Рисунок 1 – Внешний вид электрического соединителя типа СНП306

Описание объекта испытаний

Соединители СНП306 – вилки для печатного монтажа, розетки для печатного монтажа и для объемного монтажа методом накрутки и пайки – предназначены для соединения цепей постоянного, переменного и импульсного токов в электронно-вычислительной аппаратуре, в радиоэлектронной аппаратуре общепромышленного и бытового применения и других изделиях электронной техники (рис. 1).

По просьбе заказчика может быть обеспечена поставка соединителей с произвольным количеством контактных пар (от одной до 96). Различное число контактов достигается путем соответствующего их расположения в изоляторе.

Прямоугольные электрические соединители типа СНП306 обладают следующими техническими характеристиками:

- 1) максимальное рабочее напряжение (амплитудное значение) – 400 В;
- 2) рабочий ток на каждую контактную пару – 2 А;
- 3) сопротивление электрического контакта (не более) – 15 мОм;
- 4) температура окружающей среды – от от минус 60°С до плюс 70°С;
- 5) наработка до отказа – 10000 ч при 100 условных циклах сочленений-расчленений.

Соединители типа СНП306 выпускаются на изоляторах четырех типоразмеров – (двухрядные с шагом 2,5 мм и 2,54 мм, трёхрядные с шагом 2,5 мм и 2,54 мм) с числом контактов: двухрядные - 64, 48, 40, 32, 16 контактов, трёхрядные - 96, 64, 48, 32, 16 контактов.

По просьбе заказчика может быть обеспечена поставка соединителей с произвольным количеством контактных пар (от одной до 96). Различное число контактов достигается путем соответствующего их расположения в изоляторе. Соединители СНП306 – аналоги соединителей СНП 58, СНП 59, СНО 63, СНО 64 и DIN 41612 (рис. 2).

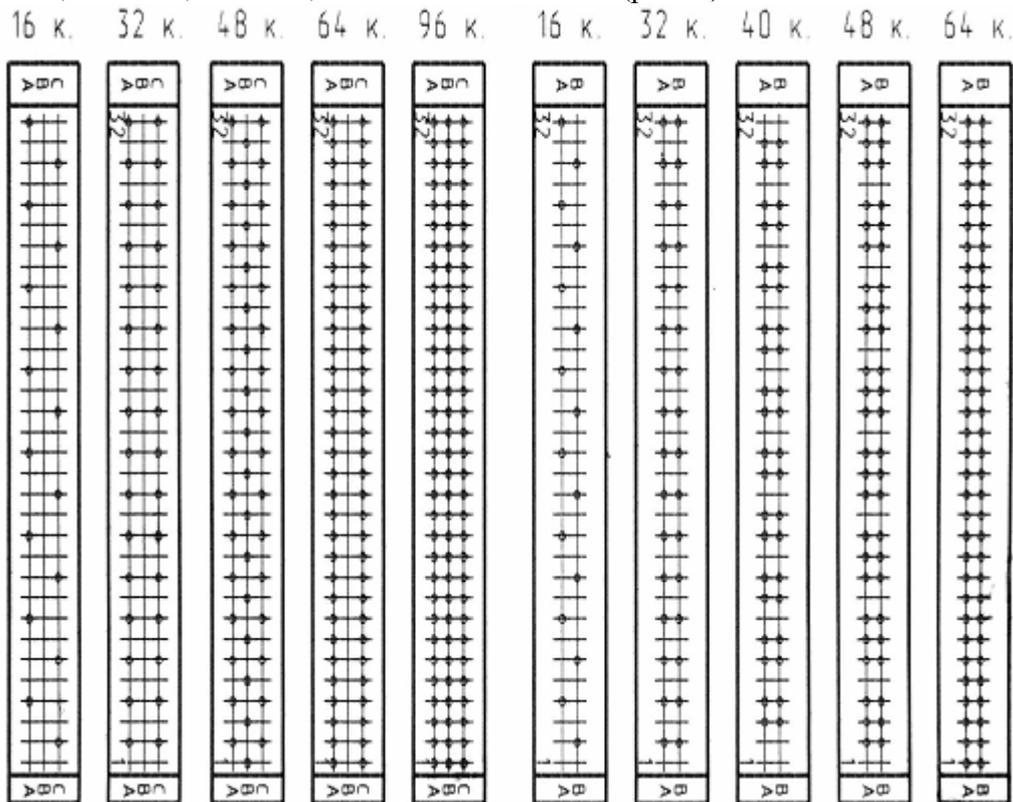


Рисунок 2 – Варианты конструктивного исполнения соединителя СПН306

Анализ требований заказчиков

Одной из основных технических характеристик соединителей является усилие сочленения. С одной стороны, оно должно быть большим, чтобы обеспечить удаление окисных плёнок при замыкании контактных пар и их неподвижность в замкнутом состоянии. А с дру-

гой стороны, оно должно быть малым, чтобы обеспечить минимальный износ электропроводного покрытия при замыкании контактных пар. Эти два требования противоречат друг другу, поэтому для соединителей задаются оптимальные значения усилий сочленения, которые контролируются у готовых разъёмов при проведении приёмочного контроля. В нормативных документах (ГОСТ, ТУ) усилие сочленения задаётся на разъём в целом. Для прямоугольных электрических соединителей, в которых на изоляторе может быть расположено произвольное количество контактных пар – от нескольких штук до нескольких сотен – такого нормирования недостаточно. Если по просьбе заказчика необходимо обеспечить поставку прямоугольных электрических соединителей с количеством контактных пар, меньшем их количества в нормальном исполнении, изготовитель должен предоставить объективные доказательства того, что действительное значение усилия сочленения не будет меньше допустимого значения. Другими словами, разъём с неполным набором контактных пар должен иметь усилие сочленения в пределах допустимых значений.

При заключении договора на поставку соединителей типа СПН306 заказчик задаёт верхний предел силы сочленения $F_{\text{доп}}$, которое зависит от количества контактных пар в разъёме. Действительное значение силы сочленения $F_{\text{д}}$ не должно быть больше допустимого значения, для расчёта которого заказчик задаёт формулу:

$$F_{\text{доп}} = k_1 \cdot N, \quad (1)$$

где $F_{\text{доп}}$ – верхний предел допустимого силы сочленения, кгс;

N – количество контактных пар в разъёме;

k_1 – коэффициент пропорциональности, заданный заказчиком ($k_1 = 0,1125$).

В технических условиях сила сочленения задаётся на разъём в целом. Если по просьбе заказчика необходимо обеспечить поставку соединителей с нестандартным количеством контактных пар, изготовитель должен предоставить доказательства того, что значение силы сочленения не будет меньше допустимого.

Методика определительных испытаний

Чтобы проверить способность предприятия выполнить требования заказчика, проведены испытания соединителей на силу сочленения. Целью испытаний стало получение экспериментальной зависимости силы сочленения от числа контактных пар в разъёме.

Содержание методики.

1 Измерение силы расчленения контактов с контрольным калибром проводится в соответствии с отраслевым стандартом электронной промышленности.

2 Измеряется сила сочленения на 96 контактных парах для 5 соединителей (вилка и розетка).

3 В каждой розетке удаляется контакт В32. Измеряется сила сочленения для 95 контактов розетки и 96 контактов вилки.

4 В розетках удаляются контакты В30, В28, В26 и т.д. до В2. Измеряется сила сочленения 94 контактной, 93 контактной, 91 контактной и т.д. до 80 контактной розетки с 96 контактной вилкой (рис. 3, схема №1).

5 В розетках удаляются контакты С31, С29, С27, С25 и т.д. до С1. Измеряется сила сочленения 79 контактной, 78 контактной, 77 контактной, 75 контактной и т.д. розетки с 96 контактной вилкой (рис. 3, схема №2).

6 В розетках удаляются контакты А31, А29, А27, А25 до А1. Измеряется усилие сочленения 63 контактной, 62 контактной, 61 контактной и т.д. до 48 контактной розетки с 96 контактной вилкой (рис. 3, схема №3).

7 На двух розетках контролировать максимальные рабочие напряжения по методике, изложенной в отраслевом стандарте (ОСТ).

8 В розетках удаляются контакты В31, В29, В27 и т.д. до В1. Измеряется усилие сочленения 47 контактной, 46 контактной, 45 контактной и т.д. до 32 контактной розетки с 96 контактной вилкой.

9 В розетках удаляются контакты С32, С30 и т.д. до С2. Измеряется усилие сочленения 31 контактной, 30 контактной и т.д. до 16 контактной розетки с 96 контактной вилкой.

10 Обработка результатов, получение экспериментальной зависимости.

Определительные испытания были проведены в период производственной практики, на базе испытательной лаборатории завода «Электродеталь».

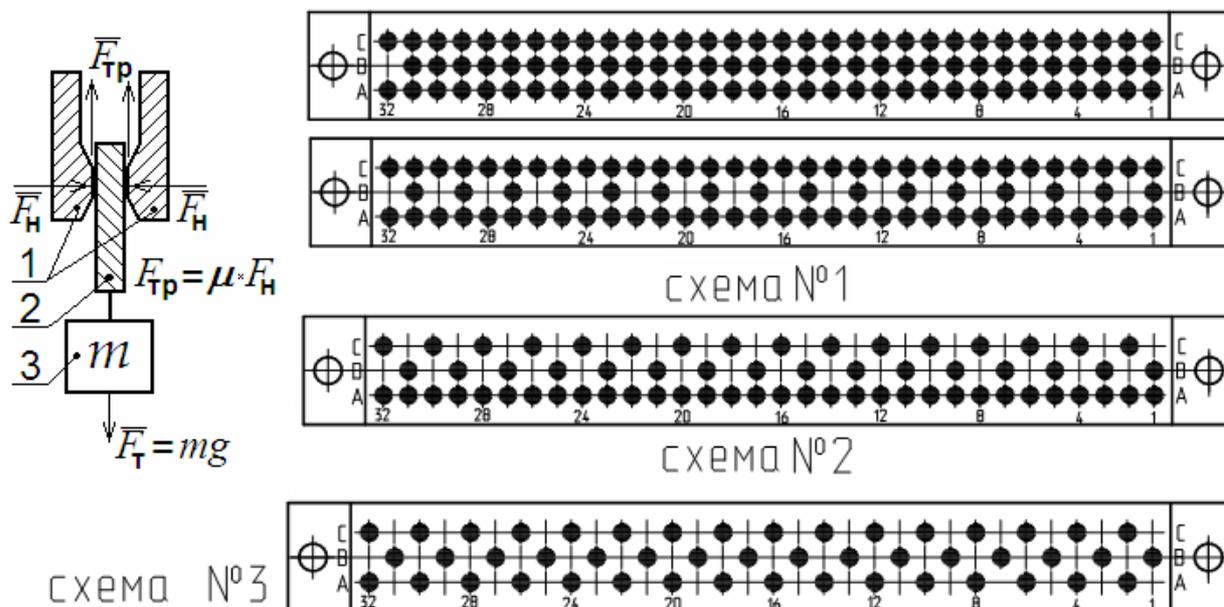


Рисунок 3 – Физический принцип измерения силы сочленения и схемы розеток

Эмпирическая формула силы сочленения

В результате проведения определительных испытаний получена эмпирическая формула силы сочленения прямоугольных электрических соединителей с произвольным количеством контактных пар, графическая интерпретация которой показана на рисунке 4.

Данная формула позволяет рассчитать действительное значение силы сочленения, которое обеспечивается технологическими возможностями предприятия и оценить степень соответствия технологии предприятия требованиям заказчика.

Обработка опытных данных позволила получить коэффициент, с помощью которого можно рассчитать действительное значение усилие сочленения и уточнить требования заказчика к этой характеристике:

$$F_{\text{доп}} = k_2 \cdot N, \quad (2)$$

где k_2 – коэффициент, полученный по результатам испытаний ($k_2 = 0,0765$).

Анализ результатов исследований показывает, что требования заказчика могут быть выполнены для 100 % соединителей, выпускаемых предприятием.

При сопоставлении допустимого значения усилия сочленения с его действительными значениями был рассчитан коэффициент запаса $k_3 = 0,32$ (32 %). Его значение постоянно для любого количества контактных пар, следовательно, технология их производства стабильна и позволяет удовлетворить заказчика.

Графики зависимостей допустимого значения силы сочленения от количества контактных пар в разъёме показаны на рисунке 3.

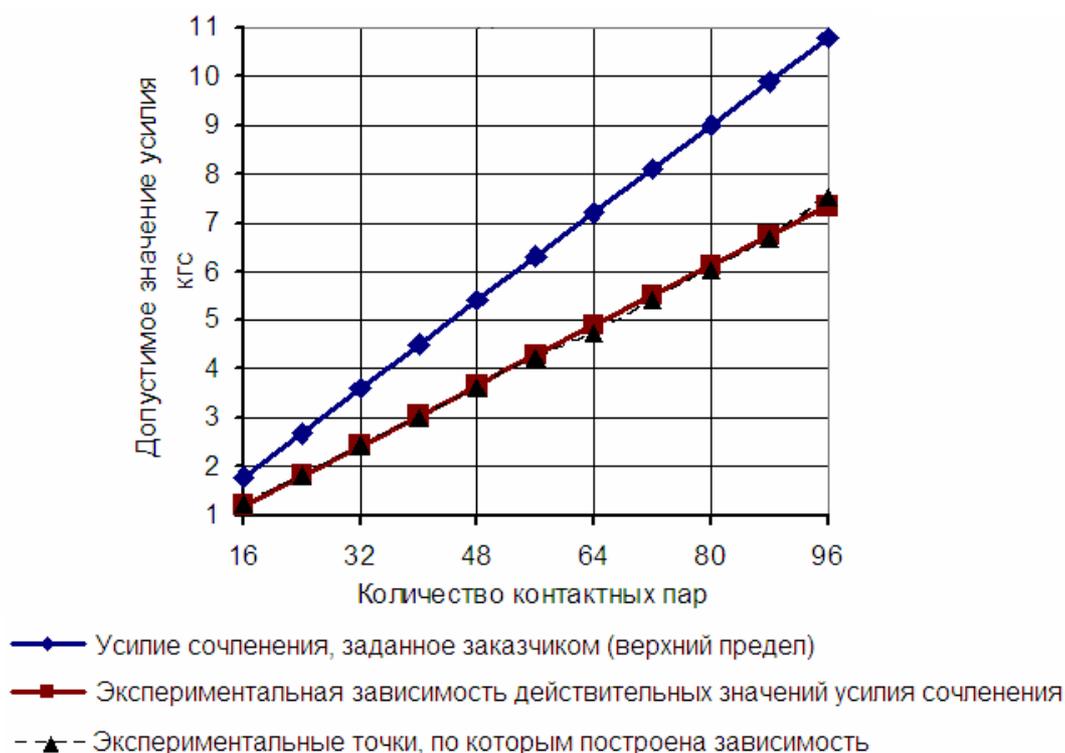


Рисунок 3 – Графики зависимостей допустимого значения силы сочленения от количества контактных пар в разъёме

Выполненное исследование проведено по заказу ОАО «Карачевский завод «Электродеталь» – ведущего предприятия России в области производства прямоугольных электрических соединителей для радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники. Результаты исследований переданы в производство и используются для подтверждения способности предприятия выполнять требования заказчиков к конструкциям соединителей.

Беликов Павел Павлович

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Карачев
Студент факультета «Технология машиностроения»
Тел. (48335)2-00-72
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Лебедева Лариса Ильинична

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Карачев
Старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»,
ОАО «Карачевский завод «Электродеталь», г. Карачев
Заместитель главного конструктора
Тел. (48335)2-00-72
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Ларичев Александр Александрович

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Карачев
Преподаватель кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (48335)2-00-72
E-mail: pms35vm@yandex.ru

P.P. BELIKOV, L.I. LEBEDEVA, A.A. LARICHEV

RECEIVE OF EMPIRIC FORMULA STRENGTH OF JUNCTION THE RECTANGULAR ELECTRICAL CONNECTORS WITH ARBITRARY QUANTITY OF CONTACT PAIRS ON THE RESULTS TRIALS FOR DEFINE

In the results of carry out trials for define the rectangular electrical connectors is receive of empiric formula strength of junction for the connector with arbitrary quantity of contact pairs. Its formula is allowing value of conformity the technological possibility undertaking the demands of customer to this parameter.

Keywords: *technology; rectangular electrical connector; strength of junction; trials for define; empiric formula; contact pair of connector*

Belikov Pavel Pavlovich

Karachev Branch of FSBEI HVT «State University – ESPC», Karachev
Student, Faculty of Mechanical Engineering
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Lebedeva Larisa Ilyinichna

Karachev Branch of FSBEI HVT «State University – ESPC», Karachev
Senior Lecturer, Dep. of Mechanical Engineering,
Electrodetail Co., Karachev, Russia
Deputy Chief Designer
Phone. (48335) 2-00-72
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Larichev Alexander Alexandrovich

Karachev Branch of FSBEI HVT «State University – ESPC», Karachev
Lecturer, Dep. of Mechanical Engineering
Phone. (48335) 2-00-72
E-mail: pms35vm@yandex.ru

УДК 681.5

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, С.А. МОЙСЕЕВ

ПРОГНОЗИРУЮЩИЙ КОНТРОЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С АДАПТИВНЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ ВРЕМЕНИ Часть 1. Теоретические основы и модели, характеристики дрейфа параметров

Рассмотрена задача прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с интервалами времени между контролем, адаптивными к состоянию объекта. Представлены имитационно-аналитическая модель прогнозирования и результаты исследования характера дрейфа определяющих параметров.

Ключевые слова: *контроль, прогнозирование, радиоэлектронная аппаратура, определяющие параметры*

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безотказности и высокой эффективности эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) всегда являлось важнейшей проблемой, решение которой обеспечивается комплексом мероприятий как на стадиях проектирования и производства, так и при экс-

плуатации. Анализируя причины и характеристики отказов РЭА, следует отметить, что доминирующим видом (до 90 % от общего числа по данным [1]) являются постепенные (параметрические) отказы, возникающие в результате деградиационных процессов в радиоэлементах и характеризующиеся постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Поэтому предотвращение постепенных отказов, а следовательно, поддержка работоспособного состояния РЭА – это одна из важнейших функциональных задач при ее эксплуатации.

Решение указанной задачи базируется на периодическом контроле параметров состояния объекта через определенные (межконтрольные) интервалы времени. Одной из принципиальных особенностей такого контроля является то, что решение фактически принимается о будущем ее состоянии. Например, решение о работоспособном состоянии и допуске экземпляра РЭА к дальнейшей эксплуатации предполагает, что он не откажет до следующего момента контроля. Оценка же будущего состояния объекта на основе информации о его прошлом и настоящем – задача индивидуального прогноза. Таким образом, операция контроля обязательно должна включать решение задачи индивидуального прогноза, что и определило появление понятия прогнозирующего контроля [2, 3, 4].

Важнейшим вопросом организации прогнозирующего контроля является правильное задание его периодичности. Так при завышенном межконтрольном интервале возрастает вероятность возникновения постепенных отказов в процессе функционирования РЭА, что может привести к срыву выполнения целевых задач и дополнительным затратам на текущий ремонт. При необоснованно сокращенном интервале увеличивается время отрыва РЭА от выполнения задач по предназначению и возрастают затраты на ее эксплуатацию. Следовательно, существует некоторая оптимальная периодичность контроля, обеспечивающая наибольшую эффективность эксплуатации аппаратуры. При этом очевидно, что указанная оптимальная периодичность зависит не только от типа аппаратуры и условий ее эксплуатации, но и от конкретных характеристик каждого экземпляра. Таким образом, задание оптимального межконтрольного интервала должно учитывать индивидуальные характеристики каждого объекта, то есть должно быть индивидуальным. И, наконец, наиболее перспективной, на наш взгляд, является организация прогнозирующего контроля по гибкой стратегии с переменным межконтрольным интервалом, зависящим от фактического состояния конкретного объекта – контроль с адаптивными интервалами времени. На реализацию контроля РЭА в такой концепции и направлена настоящая работа.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ степени научной проработки вопросов, связанных с прогнозирующим контролем РЭА, показывает, что имеется большое количество публикаций по смежным проблемам, в частности, по вопросам управления профилактическими работами, прогнозирования технического состояния, экспериментального определения показателей надежности РЭА и др. Основной вклад в научную проработку указанных проблем внесли многие советские и российские ученые: Калявин В.П., Кудрицкий В.Д., Пестряков В.Б., Гаскаров Д.В., Чуев Ю.В., Абрамов О.В. и др. Существенный вклад в решение проблемы управления надежностью внесли зарубежные ученые Дж. Бендат, А. Пирсон, Дж. Блек, С.М. Шендон, С. Маки и др.

Прогнозирующий контроль является эффективным средством улучшения апостериорных показателей надежности обслуживаемых объектов. Основная задача прогноза при контроле – определение остатка времени жизни (времени сохранения работоспособности) контролируемого объекта. Необходимым элементом прогноза в данной постановке является экстраполяция известной части реализации в область будущих значений. В тех случаях, когда для принятия решения используется время жизни, говорят о прогнозировании надежности. Если же используется непосредственно будущее значение реализации, говорят о прогнозировании технического состояния [2]. В обоих случаях качество экстраполяции обуславливает качество прогнозирующего контроля в целом.

Одним из практически возможных случаев является случай, когда априорная информация об объекте (плотность распределения времени достижения параметром своего предельного значения) вообще отсутствует, и наличные данные исчерпываются известным отрезком реализации. При этом чаще всего наблюдения представляются в виде ряда значений этой реализации, измеренных в дискретные моменты времени. В этом случае единственно возможным оказывается детерминированный подход к решению задачи экстраполяции. С его использованием принимается гипотеза о том, что известная часть реализации процесса изменения параметра отражает неизвестную, но неслучайную зависимость исследуемого параметра от времени. В результате задача сводится к отысканию аналитического выражения, достаточно точно отражающего исследуемую зависимость, после чего продление реализации на любой заданный интервал уже не составляет труда.

Применительно к проблеме прогноза задача отыскания аппроксимирующего выражения имеет две основные модификации. Одна из них – использование для экстраполяции интерполяционного полинома, степень которого равна числу известных значений параметра, а каждое из них предполагается точным (измеренным без ошибок). Однако на практике предположение о малости погрешностей измерения часто оказывается несправедливым. В связи с этим применительно к РЭА наиболее корректной является вторая модификация, базирующаяся на методе наименьших квадратов. В этом случае вид аппроксимирующего выражения выбирается исследователем, а математическая обработка обеспечивает получение оптимальных значений его коэффициентов. Этот метод несложен в вычислительном отношении, однако на его эффективность могут существенно влиять субъективные факторы, а процедура подбора аппроксимирующего выражения с трудом поддается формализации.

В связи с этим, главная трудность решения задачи определения оптимального межконтрольного интервала времени с применением последнего подхода состоит в отсутствии научного аппарата, обеспечивающего адаптацию модели прогнозирования на основе полученных в процессе эксплуатации объекта исходных данных. Кроме того, известные методики предполагают решение задачи без учета погрешностей контроля при съеме информации и погрешностей при определении модели тренда. Допуски на определяющие параметры современной РЭА соизмеримы с погрешностями средств измерения этих параметров, поэтому без учета указанных погрешностей использование данных методик применительно к рассматриваемым объектам некорректно.

Недостатки подхода могут быть устранены, если задачу прогнозирования решать в рамках создания адаптивного метода прогнозирующего контроля, предусматривающего процедуру логического отбора вида трендовой модели и выбора условий прогнозирования с учетом особенностей дрейфа определяющего параметра конкретного объекта контроля. В основу метода должна быть заложена процедура индивидуального прогнозирования состояния каждого экземпляра РЭА на основе изучения закономерностей постепенного изменения параметров этого экземпляра в процессе его работы. Таким образом, для практической реализации методов прогнозирующего контроля должны быть известны закономерности изменения параметров РЭА во времени.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЭА

Техническое состояние РЭА наиболее полно можно оценить совокупностью выходных параметров, то есть

$$Y(t) = f \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_i(t), \dots, y_n(t)\},$$

где n - число определяющих параметров (параметров, при уходе которых за допустимые пределы объект контроля становится неработоспособным).

С целью выявления закономерностей изменения параметров РЭА во времени анализировались результаты сбора и обработки экспериментальных данных дрейфа следующих параметров РЭА:

– мощности сигнала радиопередающего устройства (объем выборки 31);

- шумового параметра радиоприемного устройства (объем выборки 38);
- уровня сигнала контрольной частоты на линейном выходе аналоговой системы передачи (объем выборки 53);
- уровня сигнала на выходе генератора шума (объем выборки 64).

Задачей анализа являлось исследование характеристик процессов дрейфа параметров, а также законов распределения в сечениях процессов, соответствующих моментам контроля. Статистическая однородность экспериментально полученной информации обеспечивалась за счет подбора экземпляров РЭА, имеющих единую технологию производства и одинаковые условия эксплуатации, а также за счет единой методики измерений и обработки результатов измерений исследуемых параметров.

На первом этапе исследовался вид закона распределения вероятности значений параметров в сечениях процессов, соответствующих моментам контроля. На основании критерия χ^2 Пирсона с достоверностью $\beta = 0,9$ (при уровне значимости $\alpha = 0,1$) получены положительные результаты проверки гипотезы о нормальном законе распределения в сечениях случайных процессов изменения указанных выше исследуемых параметров.

С целью определения характеристик нестационарности процессов дрейфа параметров использовались оценки математического ожидания m_y , дисперсии D_y и автокорреляционной функции r_y . Закономерность дрейфа характеристик рассматриваемых случайных процессов определялась путем сглаживания их статистических оценок по всем сечениям процессов методом наименьших квадратов. В качестве иллюстрации на рисунке 1 представлены характерные графики изменения во времени указанных статистических оценок и их доверительные границы ($\beta = 0,9$) для уровня сигнала на выходе генератора шума.

Анализ результатов показывает, что дрейф параметров представляет собой случайный процесс, нестационарный как по математическому ожиданию, так и по дисперсии, при этом дисперсия процессов с течением времени имеет тенденцию к увеличению.

Установлено, что для всех исследуемых процессов нормированная автокорреляционная функция (НАКФ) r_y имеет два качественно различных участка (рис. 1, в). Начальный участок (ниспадающий, с крутым изменением функции) характеризует НАКФ случайной составляющей, интервал корреляции которой мал и не превышает периода между измерениями параметра. Последующий участок (медленное изменение функции) определяется свойствами детерминированной составляющей.

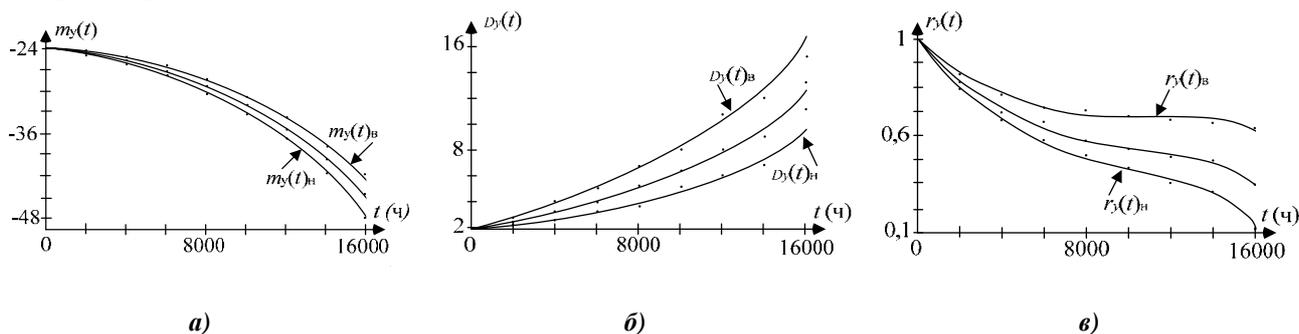


Рисунок 1 – Кривые, аппроксимирующие математическое ожидание (а), дисперсию (б) и корреляционную функцию (в) изменения уровня сигнала на выходе генератора шума

В целом изменение r_y на каждом из участков различно, что позволяет сделать вывод о том, что случайные процессы, описывающие изменения параметров РЭА во времени, являются аддитивными нестационарными, имеют детерминированную и случайную составляющие, и могут быть представлены обобщенной моделью вида

$$y(t) = \tilde{y}(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\tilde{y}(t)$ - детерминированная функция времени, описывающая протекание необратимых физических процессов;

$\varepsilon(t)$ - стационарный случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций внешних и внутренних условий.

В [5] показано, что при идентификации обобщенной модели (1) наиболее распространенными моделями ее детерминированной составляющей, являются следующие функции:

- линейная:
$$\Pi(t) = a_0 - a_1 t ; \tag{2}$$

- экспоненциальная:
$$\Pi(t) = \Pi_0 \cdot e^{-\frac{vt}{T_0}} ; \tag{3}$$

- логарифмическая:
$$\Pi(t) = \Pi_0 - \Pi_0 \cdot \ln\left(1 - \frac{vt}{\Pi_0}\right) ; \tag{4}$$

- степенная (параболическая):
$$\Pi(t) = a_0 \mp a_1 t + a_2 t^2 . \tag{5}$$

Представленные аналитические выражения позволяют реализовать процедуру прогнозирования технического состояния, однако для прогнозирования надежности, т.е. определения времени сохранения работоспособности объекта, необходимо получить аналитические зависимости, связывающие между собой время достижения параметром предельного состояния $T_{пр}$, текущее время t , значение параметра в текущий момент времени $\Pi(t)$, а также предельно допустимое значение параметра $\Pi_{пр}$. Указанные зависимости представляет собой уравнения отказа по определяющему параметру.

Для вывода уравнений отказа использована обобщенная модель вида [6]

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = -kF(\Pi) , \tag{6}$$

где Π - определяющий параметр РЭА;

k - коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости протекания процесса износа или старения;

$F(\Pi)$ - функция, определяемая принятой гипотезой о характере процессов износа или старения рассматриваемой РЭА.

Уравнения отказа для моделей дрейфа параметров, представленных выражениями (2) – (5) соответственно, получены в виде:

$$\Pi(t) = \Pi_{пр} - a_1(t - T_{пр}) ; \tag{7}$$

$$\Pi(t) = \Pi_{пр} \cdot e^{-v(t - T_{пр})/\Pi_0} ; \tag{8}$$

$$\Pi(t) = \Pi_{пр} - \Pi_0 \cdot \ln\left(1 - \frac{v(t - T_{пр})}{\Pi_0}\right) ; \tag{9}$$

$$\Pi(t) = \Pi_{пр} \mp 2\sqrt{a_2} \cdot \sqrt{\Pi_{пр} - a_0 + \frac{a_1^2}{4a_2}} \cdot (t - T_{пр}) + a_2(t - T_{пр})^2 . \tag{10}$$

ПОДХОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Структурная модель индивидуального прогнозирования экстраполяцией (рис. 2) включает в себя четыре основных этапа: обучающий эксперимент, обучение, экзамен и собственно прогнозирование [5].

Обучающий эксперимент – это испытание в заданном режиме n экземпляров РЭА в течение некоторого длительного времени и определение фактического состояния $\tilde{y}(t_{пр})$ каждого экземпляра к моменту прогнозирования $t_{пр}$. Цель обучающего эксперимента состоит в получении массива исходных данных, необходимых для последующего использования.



Рисунок 2 – Структурная модель индивидуального прогнозирования экстраполяцией

Обучение заключается в обработке исходных результатов по некоторому оператору прогнозирования (аппроксимирующей функции) H_y и в определении прогнозируемого состояния $\tilde{y}^*(t_{пр})$ каждого из n экземпляров к моменту времени $t_{пр}$ (прогнозирование на интервал экстраполяции $\tau_{э1}$).

Экзамен состоит в проверке соответствия оценки значения прогнозируемого параметра $\tilde{y}^*(t_{пр})$ его фактическому значению $\tilde{y}(t_{пр})$, известному по данным обучающего эксперимента для каждого из n экземпляров РЭА. На данном этапе определяется величина отклонения оценки значения прогнозируемого параметра от его действительного значения $\Delta = \tilde{y}(t_{пр}) - \tilde{y}^*(t_{пр})$, характеризующая ошибку прогноза. Точность прогнозирования оценивается величиной дисперсии ошибки:

$$D_{ош} [\tilde{y}(t_{пр}) - \tilde{y}^*(t_{пр})] = D_{ош} (\Delta^j).$$

Осуществляется выбор оператора и условий прогнозирования, обеспечивающих минимальную дисперсию ошибки прогноза.

Собственно прогнозирование заключается в применении скорректированных оператора и условий прогнозирования для прогнозирования состояния конкретного экземпляра РЭА на следующий интервал экстраполяции $\tau_{э2} = \tau_{э1}$. Всякие статистически значимые изменения (тип РЭА, условия эксплуатации и т. п.) требуют проведения нового обучающего эксперимента, обучения и экзамена, т.к. нарушится статистическая устойчивость свойств объекта прогнозирования.

С целью повышения точности прогнозирования технического состояния РЭА произведен анализ процесса образования погрешности прогнозирования Δ_y и выделено четыре группы дестабилизирующих факторов.

Факторы первой группы определяются несоответствием выбранной модели дрейфа параметра (оператора прогнозирования) реальной форме детерминированной составляющей прогнозируемого процесса. Ослабление воздействия указанных факторов производится на основе логического анализа результатов прогнозирования. Вместе с тем однозначных методических рекомендаций по выбору оператора прогнозирования (ОП) к настоящему времени не разработано. Наиболее верным показателем выбора может служить сравнительный анализ точности прогнозирования для одного и того же параметра изделия при использовании различных операторов.

Факторы второй группы обусловлены влиянием флуктуационной составляющей процесса дрейфа параметров. К ним относятся быстротекущие во времени, но незначительные по величине обратимые изменения параметра, вызванные воздействием различных случай-

ных факторов, а также погрешности измерения значений параметра в моменты контроля. Различить эти составляющие между собой практически не всегда удается, поэтому часто принято говорить о единой флуктуационной составляющей $\Delta_{фл}$, включающей флуктуацию процесса и флуктуацию измерений.

Третья группа факторов представляет собой погрешности аппроксимации результатов измерений, возникающие при использовании конкретных методов сглаживания (МС). Методы сглаживания не являются абсолютно точными и вносят свою составляющую в общий результат погрешности, которую можно определить как величину погрешности коэффициентов оператора прогнозирования $\Delta_{коэф}$.

Четвертая группа дестабилизирующих факторов определяется условиями прогнозирования. К ним относятся: время наблюдения t_n ; число отсчетов k на интервале наблюдения; интервал времени между отсчетами Δt_i ; интервал экстраполяции $\tau_э = t_{пр} - t_k$.

Указанные источники погрешности прогнозирования взаимосвязаны и вносят свой вклад на различных этапах решения задачи прогнозирования.

Обобщенная схема последовательного образования суммарной погрешности прогнозирования представлена на рисунке 3.

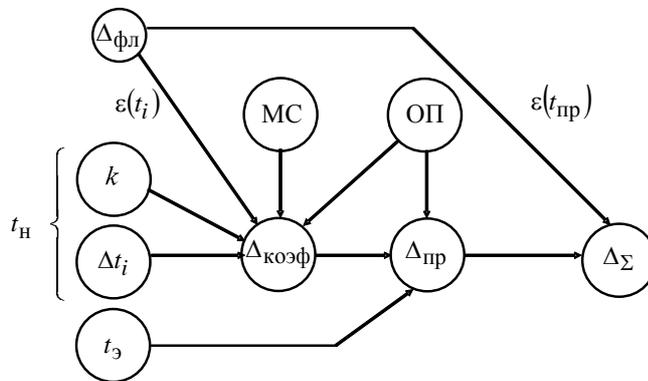


Рисунок 3 – Обобщенная схема последовательного формирования погрешности прогнозирования

Учесть все рассмотренные источники погрешности прогнозирования в единой аналитической модели затруднительно. Поэтому для обоснования выбора оператора и условий прогнозирования, обеспечивающих повышение точности прогноза при реализации прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры разработана имитационно-аналитическая модель прогнозирования технического состояния, которая позволяет учесть перечисленные виды погрешностей. Структура модели представлена на рисунке 4.

Процедура получения нестационарного дискретного случайного процесса, соответствующего процессу дрейфа определяющего параметра, включает:

1. Формирование значения момента времени в i -м сечении случайного процесса в соответствии с заданными условиями прогнозирования: $t_i = (i - 1)\Delta t$.

2. Формирование коэффициентов $\{a_1...a_m\}$ модели детерминированной составляющей случайного процесса в соответствии с заданным законом распределения для трех встречающихся на практике случаев:

- параметр в сечениях процесса принимает случайные значения, распределенные по нормальному закону, а дрейф параметра происходит монотонно для всей выборки РЭА, что соответствует случаю, когда изделия эксплуатируются в одних условиях;
- параметр всей выборки РЭА имеет одинаковое значение, а скорость дрейфа параметра у различных РЭА различна, что соответствует случаю, когда проведена регулировка параметра всех изделий и условия эксплуатации изделий различны;
- объединение двух вышеизложенных ситуаций.

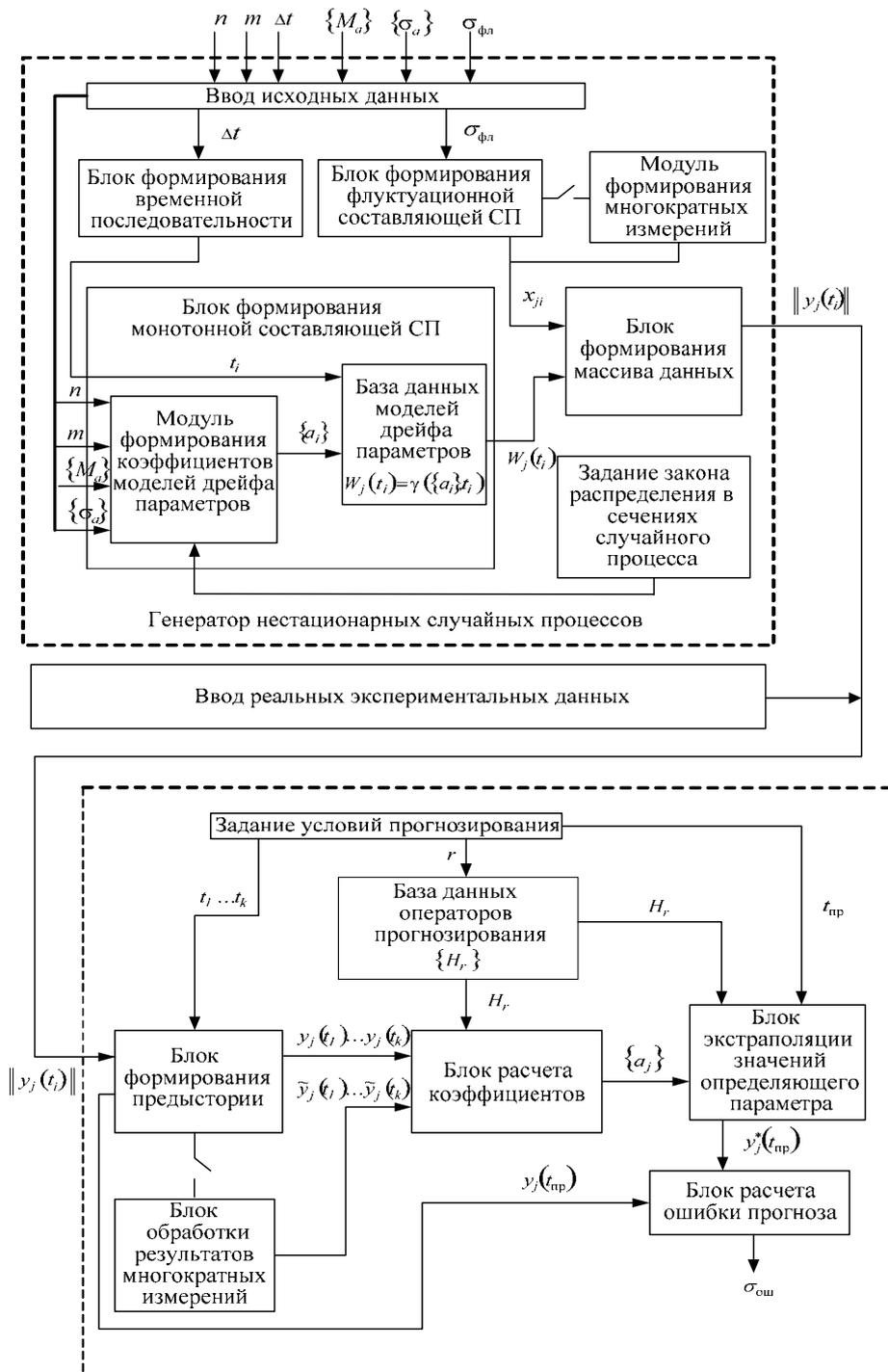


Рисунок 4 – Структура имитационно-аналитической модели прогнозирования технического состояния РЭА

3. Формирование детерминированной составляющей j -й реализации случайного процесса в соответствии с заданной моделью дрейфа параметра, хранящейся в базе данных:

$$W_j(t_i) = \gamma(\{a_1 \dots a_m\}, t_i).$$

4. Формирование флуктуационной составляющей случайного процесса – j нормально распределенных случайных последовательностей с нулевым математическим ожиданием и заданным среднеквадратическим отклонением $\sigma = \sigma_{\text{фл}}$ (при имитации многократных измерений с кратностью k для каждой j -й реализации процесса формируется k последовательностей).

5. Формирование нестационарного дискретного случайного процесса на основе аддитивной свертки детерминированной и флуктуационной составляющих. Характер нестационарности можно изменять, задавая необходимые постоянные значения коэффициентов модели (если они детерминированы) или их числовые характеристики (если коэффициенты являются случайными величинами).

Пример формирования нестационарного случайного процесса дрейфа параметров РЭА имитационно-аналитической моделью представлен на рисунке 5.

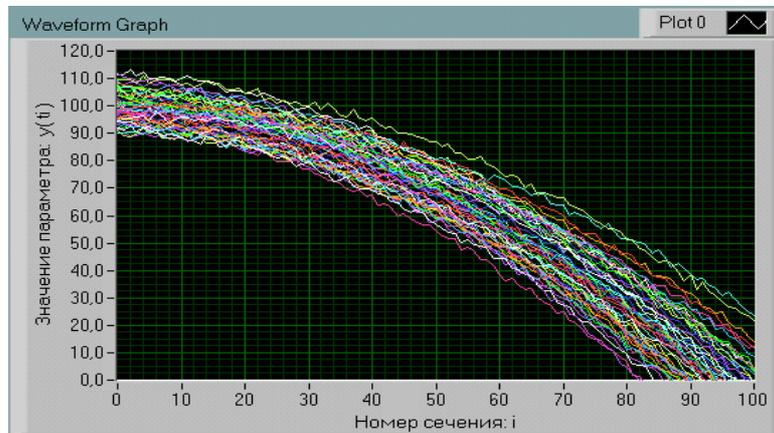


Рисунок 5 – Пример формирования нестационарного случайного процесса дрейфа параметров РЭА имитационно-аналитической моделью

Реализуемый моделью алгоритм прогнозирования включает следующие операции.

1. Задание условий прогнозирования.
2. Формирование выборки в соответствии с заданным количеством отсчетов на интервале наблюдения.
3. Обработку результатов многократных измерений (при использовании данного режима).
4. Расчет значений коэффициентов по каждой j -й реализации случайного процесса для заданного оператора прогнозирования. Выбор оператора из базы данных производится пользователем или автоматически, путем прямого перебора. Коэффициенты рассчитываются методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта.
5. Экстраполяцию значений параметра в точку прогноза по каждой реализации случайного процесса.
6. Расчет ошибки прогнозирования.

Модель реализована программно и позволяет: учитывать все рассмотренные выше источники погрешности прогнозирования; имитировать процесс многократных измерений; производить оценку точности прогнозирования по показателю среднего квадратического отклонения ошибки прогноза; осуществлять выбор оператора прогнозирования по критерию минимума ошибки прогноза. Она может быть использована как для исследования влияния различных дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования, так и для решения реальных прогнозных задач в рамках метода контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптивными интервалами времени, если информацию в схему прогнозирования подавать с реальных экземпляров РЭА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 26.260.004-91 Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации [Текст] : Руководящий документ. Методические указания.
2. Кудрицкий, В. Д. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / В. Д. Кудрицкий, М. А. Сеница, П. И. Чинаев; под ред. П. И. Чинаева. – М.: Советское радио, 1977. – 255 с.
3. Кудрицкий, В. Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств [Текст] / В. Д. Кудрицкий.

кий. – Киев: Техніка, 1982. – 168 с.

4. Давыдов, П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств [Текст] / П. С. Давыдов. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.

5. Пестряков, В. Б. Индивидуальное прогнозирование состояния радиоэлектронной аппаратуры методами экстраполяции [Текст] : учеб. пособие / В. Б. Пестряков, В. В. Андреева. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – 92 с.

6. Калявин, В. П. Основы теории надежности и диагностики [Текст] / В. П. Калявин. – СПб.: Элмор, 1998. – 172 с.

Подмастерьев Константин Валентинович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Д-р.техн.наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-02

E-mail: asms-orel@mail.ru

Моисеев Сергей Александрович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл

Соискатель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

E-mail: ant1441@yandex.ru

K. V. PODMASTERYEV, S.A. MOISEEV

**THE PREDICTING CONTROL OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT
WITH ADAPTIVE INTERVALS OF TIME**

**Part 1. Theoretical foundations and models, characteristics
of parameters' drifting**

BIBLIOGRAPHY

1. GD 26.260.004-91 Prediction of residual life of equipment to change the parameters of its technical condition during operation [text]: Guidance Document. Guidance.

2. Kudrytski, V.D. Automation control electronic equipment [text] / V.D. Kudrytski, M.A. Sinica, P.I. Chinayev, ed. P.I. Chinaev. - Moscow: Soviet Radio, 1977. – 255 p.

3. Kudrytski, V.D. Predictive control electronic devices [Text] / V.D. Kudrytski. - Kiev: Tehnika, 1982. – 168 p.

4. Davydov, P.S. Technical diagnostics electronic device [text] / P.S. Davydov. - M.: Radio and communication, 1988. – 256 p.

5. Pestryakov, V.B. Individual forecasting of electronic equipment extrapolation methods [text]: Studies manual / V.B. Pestryakov, V.V. Andreev. - Kuibyshev: KuAI, 1981. - 92 p.

6. Kalyavin, V.P. Basic theory of reliability and diagnostics [Text] / V.P. Kalyavin. - St.P.: Elmor, 1998. - 172 p.

Podmasteryev Konstantin Valentinovich

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Doctor of technical Sciences, professor, head of the department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 41-98-02

E-mail: asms-orel@mail.ru

Moiseev Sergey Aleksandrovich

FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

Degree-seeking student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

E-mail: ant1441@yandex.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.7.08

Р.В. АНИСИМОВ, А.А. РЕВЕНКОВ

КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМИ ЗУБЬЯМИ НЕЭВОЛЬВЕНТНОГО ПРОФИЛЯ

В статье рассматриваются комплексы точностных параметров, используемые для эвольвентных зубчатых колес с внутренними зубьями. Выбраны комплексы контролируемых параметров которые можно при производстве колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля и дано обоснование выбора. Предложена методика контроля точности параметров зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.

Ключевые слова: контроль, зубчатые колеса.

Развитие машиностроения привело к созданию и широкому использованию зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля, которые отличаются высокими эксплуатационными характеристиками [1]. При производстве этих изделий важным моментом является качество и точность полученной продукции. В литературе приведено большое количество информации по контролю качества и точности зубчатых колес с зубьями эвольвентного профиля, в то время как сведения по контролю параметров зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля отсутствуют. В связи с этим является актуальной разработка комплексов контролируемых параметров и методики контроля этих параметров современными техническими средствами.

При разработке комплексов контролируемых параметров для зубчатых колес с внутренними неэвольвентными зубьями целесообразно ориентироваться на комплексы параметров, которые применяются при контроле колес с внутренними эвольвентными зубьями изложенные в ГОСТ 1643-56. При контроле зубчатых колес с внутренними зубьями эвольвентного профиля установлены показатели точности, которые сведены в три группы, называемые нормами точности: нормы кинематической точности, плавности и контакта зубьев.

При выборе контролируемых параметров для колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля основными критериями были:

1. Универсальность применения для колес с внутренними зубьями любого профиля.
2. Реализация на современном измерительном оборудовании.
3. Измерение контролируемых параметров должно проводиться на зубчатом колесе без использования зацепления с эталонным колесом.

Опираясь на данные критерии, были выбраны следующие параметры - для нормы кинематической точности: накопленная погрешность окружного шага, радиальное биение зубчатого венца, колебание длинны общей нормали, погрешность обката. Для нормы плавности: циклическая погрешность, погрешность основного шага, погрешность профиля, разность окружных шагов. Нормы контакта зубьев: пятно контакта, осевой шаг, погрешность контактной линии, прямолинейность контактной линии, направление зуба.

Контроль колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе требует создания зубчатого зацепления.

Контроль кинематической погрешности колеса и колебания измерительного межцентрового расстояния требует создания зубчатого зацепления с эталонным колесом.

Трудность контроля норм контакта зубьев заключается в том, что пятно контакта измеряется при условии создания зубчатого зацепления, остальные параметры применяются при контроле косозубого колеса.

В настоящее время контроль зубчатых колес занимает весьма значительное время, требует применения специальных приспособлений и в ряде случаев не автоматизирован. Применение современных измерительно-вычислительных комплексов на основе ПК позволит автоматизировать контрольно-измерительные операции, отказаться от применения дорогостоящих специальных приспособлений, значительно сократить время контроля и оперативно влиять на точность изготовления, тем самым увеличить надёжность и долговечность эксплуатации зубчатых колес и передач. Автоматизация контрольно-измерительных операций может быть выполнена на одном универсальном координатно-измерительно-вычислительном комплексе.

Контроль параметров точности колес с внутренними зубьями невольвентного профиля осуществляется с помощью универсальной координатно-измерительной машины PRISMO 7 производства Германия (рис. 1)

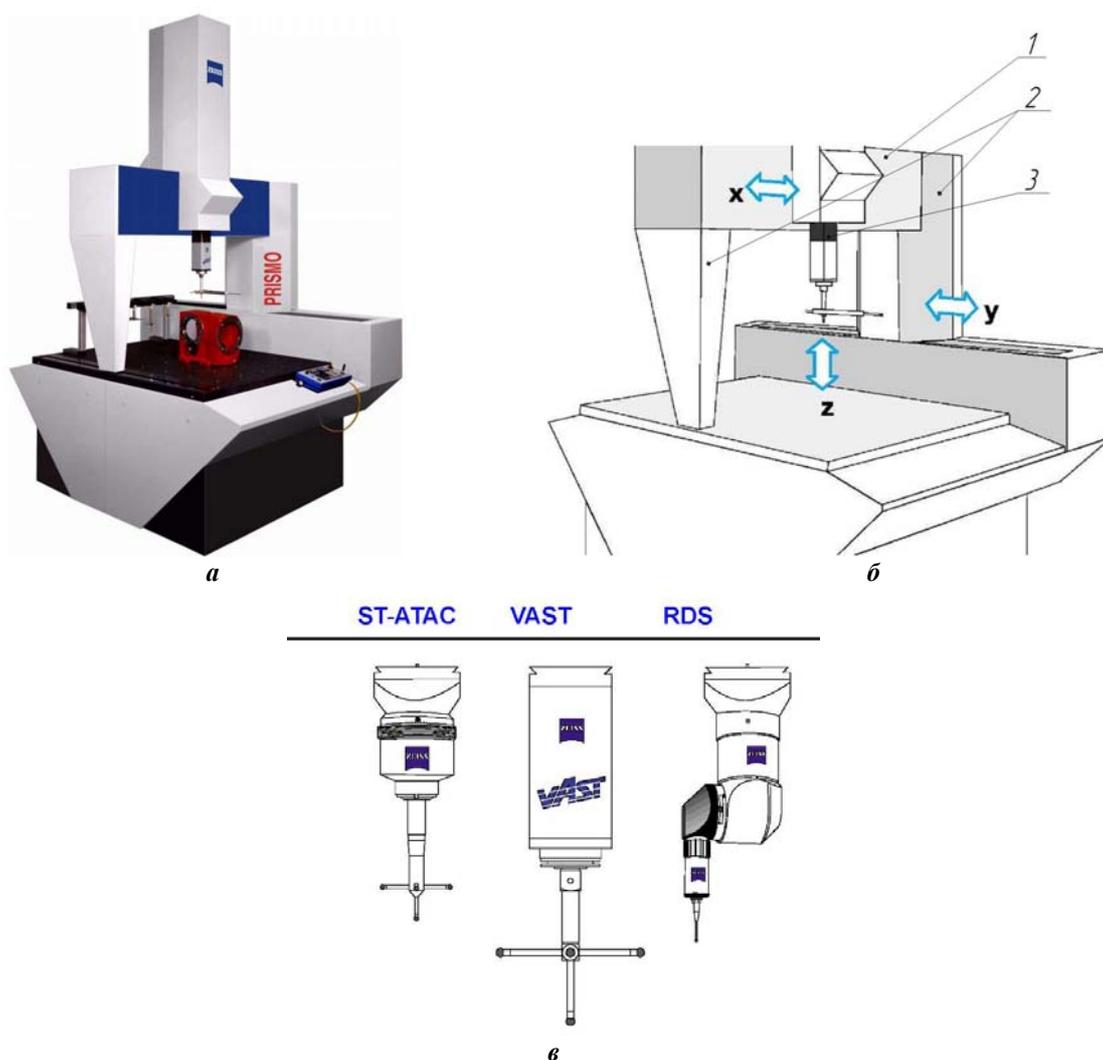


Рисунок 1 - Контрольно-измерительная машина PRISMO 7:
*а - общий вид КИМ; б – возможные направления перемещения и устройство КИМ:
1-траверса, 2-опора, 3-пиноль; в - щуповые системы.*

С помощью КИМ определяются геометрические размеры деталей. Детали могут быть из металла или пластмассы. КИМ имеет подвижные оси и может ощупывать деталь в координатных направлениях x , y и z . При использовании поворотного стола имеется дополнительно ось разворота. КИМ определяет геометрические величины, например, значения ширины, длины, высоты а также диаметра и глубины отверстий. Из данных измерений может быть рассчитано, например, положение отверстий. С помощью специального программного обеспечения может определяться далее форма деталей.

Диапазон измерений координатно-измерительной машины (КИМ):

X=700 мм;

Y=900 мм;

Z=500 мм;

КИМ предоставляет возможность проводить измерения в 3-х режимах:

1. ощупывание отдельных точек;
2. ощупывание множества точек;
3. сканирование.

Выбор режима измерения производят в зависимости задач измерения и он связан с применением определенной щуповой системы (рис. 3; табл. 1). При сканировании деталь ощупывается непрерывно. На основании измеренных точек могут рассчитываться поверхности или делается предположение о форме поверхности. Щуповые системы координатно-измерительных машин разработаны для определения координат элементов поверхностей. Это производится в общем случае с помощью ощупывания. При ощупывании поверхность детали контактирует со щуповым элементом.

Щуповая конфигурация состоит также из нескольких компонентов: сменной тарелки, щупа, узлов щуповой конфигурации. На щуповой конфигурации могут монтироваться один или несколько щупов.

Таблица 1 – Режимы работы щуповых головок

	ST-ATAC	VAST	RDS
Ощупывание отдельных точек	+	+	+
Ощупывание множества точек	-	+	-
Сканирование	-	+	-
		Универсальная	При ощупывании наклонных отверстий и других внутренних поверхностей.

КИМ может измерять в автоматическом и ручном режимах. При ручном виде работ управление процессом ощупывания осуществляется рукоятками управления, которые расположены на пульте управления. В автоматическом режиме работ управление измерениями детали производит CNC программа.

Измерение будем производить в автоматическом режиме, чтобы процесс измерения мог проводить оператор невысокой квалификации. Для проведения измерения необходима разработка управляющей программы.

Предложенные контролируемые параметры позволяют получить данные о точности зубчатого колеса с внутренними зубьями и при нарушении некоторых параметров своевременно внести поправки в процесс производства зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. КИМ PRISMO 7 позволяет проводить измерения данных параметров с высокой производительностью и точностью при реализации изложенной методики проведения измерений.

Исследование погрешностей зубчатого колеса с внутренними неэвольвентными зубьями производилось при нарезании прямозубых венцов с треугольными зубьями, $z=30$ на станке модели 5140 выпуска 1973 года. Ширина зубчатого венца - 30 мм. Инструмент – хвостовой долбяк $z=14$ из стали P6M5, спрофилированный по методике, представленной в [2]. Скорость резания 10 м/мин. Обработка без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Нарезание производилось с круговой подачей 0,44 мм/дв.ход.

Проверка нарезанных колес проводилась в измерительной лаборатории ОАО «МЛЗ». Контроль параметров осуществлялся на координатно-измерительной машине «Prizmo 7» (рис. 2).

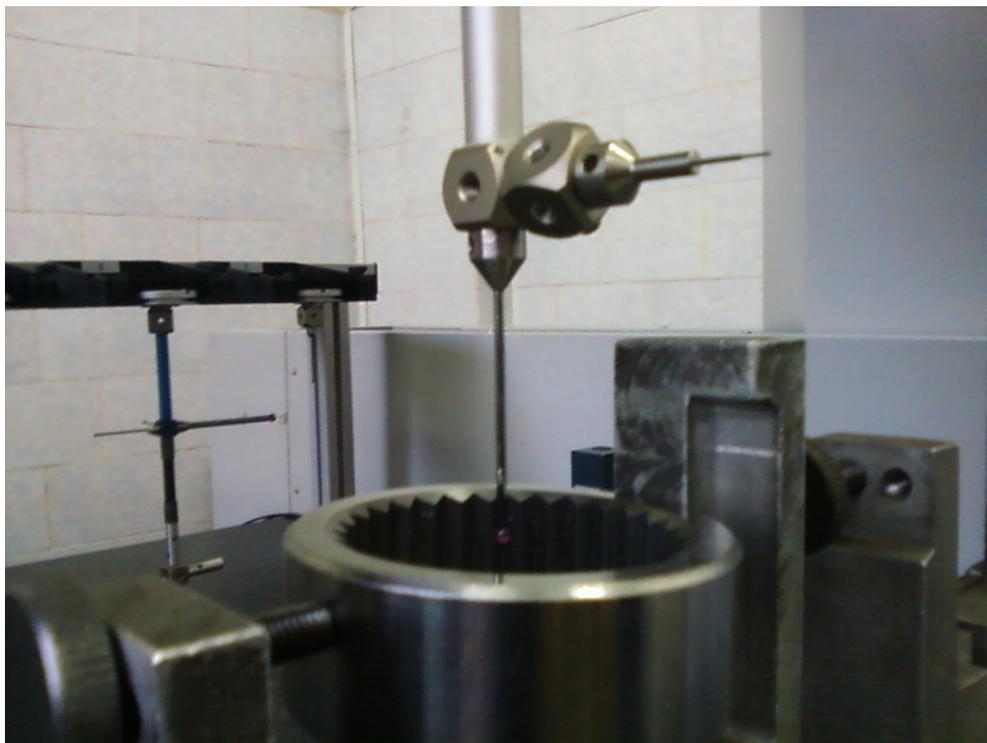


Рисунок 2 – Процесс измерения зубчатого колеса с внутренними зубьями треугольного профиля на КИМ «Prizmo 7»

Измерение проводилось в следующей последовательности:

1. При проведении измерения впервые необходимо провести калибровку, для того чтобы определить длины щупов. Далее калибровку проводят в следующих случаях:
 - если сильно изменилась температура окружающей среды и если конструкция головки состоит из узлов с различными коэффициентами температурного расширения.
 - после столкновения щуповой системы с измеряемым объектом;
 - если в щуповую конфигурацию устанавливается новый щуп
2. Устанавливают и закрепляют зубчатое колесо с внутренними зубьями неэвольвентного профиля на рабочем столе.
3. Выбираем вид измерения и конфигурацию щуповой головки. Контроль вышеуказанных точностных параметров зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля проводится в режиме сканирования и ощупывания множества точек. Для проведения этих видов измерений используется щуповая система VAST.
4. Выбор ручного режима измерения.
5. Устанавливаем скорость перемещения щуповой конфигурации.
6. Осуществляется привязка к системе координат зубчатого колеса:
 - 6.1. Касание наружного диаметра в точках 1,2,3,4 (рис. 3) для привязки системы координат к центру отверстия.
 - 6.2. Касание плоскости в точках 5 и 6, для привязки системы координат к плоскости.
7. Непосредственное измерение параметров зубчатого колеса, заключающееся в ощупывании контрольных точек указанных на рисунке 3

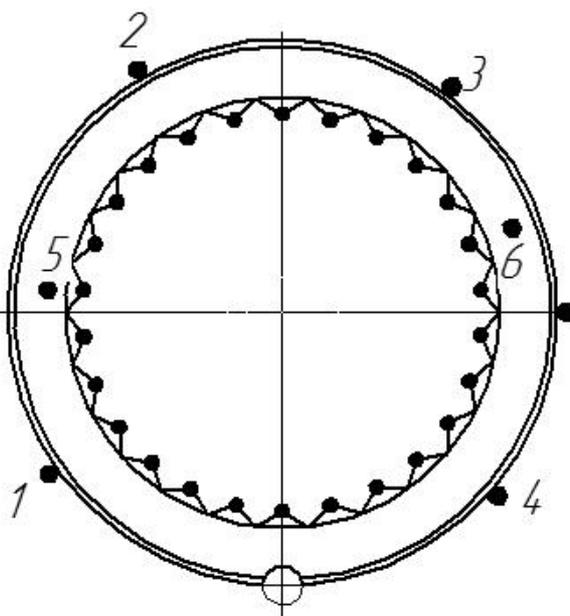


Рисунок 3 – Контролируемые точки зубчатого колеса с внутренними треугольными зубьями

Чертежом установлены требования радиального биения $F_r = 36$ мкм и отклонение шага $f_{pt} = \pm 14$ мкм. Проверке подвергались 50 колес с внутренними треугольными зубьями. Полученные данные представлены в виде полигонов распределения на рисунках 4 и 5.

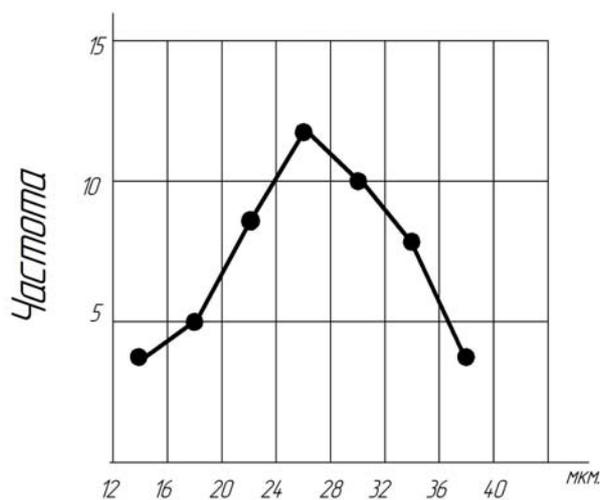


Рисунок 4 – Радиальное биение зубчатого венца

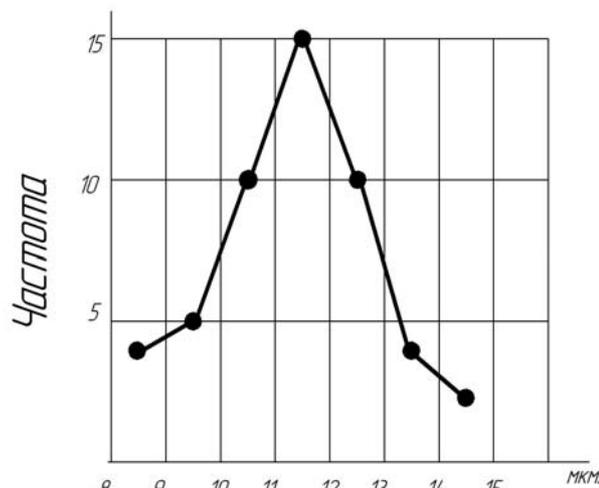


Рисунок 5 – Отклонение шага зуба

В результате промера партии процент брака составляет по первому параметру 8% по второму 4%. Полученные результаты свидетельствуют, что точность изготовленных спрофилированным инструментом колес соответствует требованиям чертежа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, Р. В. Повышение качества деталей транспортных средств с внутренними зубьями неэвольвентного профиля [Текст] / Р. В. Анисимов // Мат. междунар. научно-практ. конф. «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» (17-18 мая, 2011). Том 1, ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – 2011. – С. 91-95.
2. Анисимов, Р. В. Математическое отображение схемы обката для профилирования долбяков обрабатывающих колеса с внутренними зубьями неэвольвентного профиля [Текст] / Р. В. Анисимов, А. А. Ревенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3 – С.18-22.
3. Дерли, А. Н. Повышение эффективности зубодолбления [Текст] / А. Н. Дерли, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. – Орел : ОрёлГТУ, 2008. – 152 с.

Анисимов Роман Викторович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Аспирант
Тел. 48-18-84
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

Ревенков Александр Александрович

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орёл
Магистрант
Тел. 48-18-84
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

R.V. ANISIMOV, A.A. REVENKOV

**MONITORING OF THE EXACTITUDE OF PARAMETERS OF TOOTHED
WHEELS WITH INTERIOR TEETHS NOT INVOLUTE THE PROFILE**

In paper complexes of an exactitude of the parametres, used for involute toothed wheels with interior teeth are observed. Complexes of controllable parametres which are chosen it is possible by manufacture of sprockets with interior teeth not involute a profile and the sampling justification is given. The technique of the control of an exactitude of parametres of toothed wheels with interior teeth not involute a profile is offered.

Keywords: monitoring, toothed wheels

BIBLIOGRAPHY

1. Anisimov R.V. Quality increase in parts of vehicles with inner teeth of non-involute profile // Urgent Questions of Transport Innovation Development. Proceedings of the Int. Scientific-Practical Conf. (May 17-18, 2011). Vol. 1, FSEI HVT “State University – ESPC”. – Orel: FSEI HVT “State University – ESPC”, pp. 91-95, 2011-4.
2. Anisimov R.V., Revenkov A.A. Mathematical representation of running-in circuit for profiling shaping cutters processing cog-wheels with inner teeth of non-involute profile.// Fundamental and Engineering Problems of Technique and Technology.-№ 2/3 – Orel: RPC OrelSTU, pp. 5-18-22, 2011.
3. Derly A.N. Gear Shaping Effectiveness Increase, [Text] / A.N. Derly, A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov.- Orel: OrelSTU, pp.152, 2008.

Anisimov Roman Viktorovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Post graduate student
Phone. 48-18-84
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

Revenkov Alexander Alexandrovich

Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel
Undergraduate
Phone. 48-18-84
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

И.С. КАРТАВЦЕВ

АДАПТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПОДНАЛАДКИ СТАНКА С ЧПУ

Рассмотрена структура адаптивной системы расчета и оптимизации параметров модели изменения размера получаемого на станке с ЧПУ и периода его подналадки, использующая измерительную систему станка для определения линейного износа резца, и базирующаяся на статистическом методе управления качеством при помощи контрольных карт.

Ключевые слова: адаптация; оптимизация; тип подналадки; линейный износ; критерий оптимальности; контрольная карта.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее, в работах [4-5] рассматривались вопросы определения тренда показателя качества размерной настройки на обработку станка с ЧПУ. В частности для определения диаметра обрабатываемой детали $X(t)$, где t – номер обрабатываемой детали (наработка) с момента последней подналадки станка предлагалась следующая зависимость:

$$X(t) = a_0 + c_1 \cdot \varphi(t \cdot c_2) + \Delta, \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ – неубывающая функция, равная 0 при $t=0$, характеризующая в среднем изменение размера получаемого на станке при обработке;

a_0 – начальный уровень настройки станка на обработку, мм;

Δ – случайная компонента, связанная, например, с колебанием припуска на обработку, колебанием твердости заготовки, погрешностью базирования и др.;

c_1 – коэффициент, характеризующий изменение стойкости твердосплавной инструментальной пластинки при её замене во время подналадки станка;

c_2 – точностной коэффициент, используемый для повышения точности соответствия тренда $X(t)$ экспериментальным данным.

В работе [4] предполагается, что параметры функции $X(t)$ определяются исходя из статистической обработки первой партии или партий обрабатываемых деталей, где производится сплошной контроль продукции, но кроме этого возможен случай, когда статистическая обработка первой партии деталей невозможна в силу различных производственных факторов, и период между подналадками назначается априорно или исходя из опыта обработки подобных деталей.

Кроме параметров модели (1), согласно [4], возможна корректировка коэффициентов функции разброса значений контролируемого параметра качества:

$$dX(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_k t^k, \quad (2)$$

Это позволит использовать для оптимизации текущего контроля продукции и периода подналадки станка с ЧПУ модель размерной настройки станка, описывающую экспериментальные данные наилучшим образом, что в свою очередь дает возможность используя такой простой и широко известный статистический метод управления качеством как контрольные карты (КК), найти более близкий к глобальному локальный минимум функции затрат (функции Z) [4].

В [4] рассматривался случай обработки детали “Вал тихоходный” 10.5.1-А.001 (длина обработки резцом $L \approx 400$ мм) на токарном станке с ЧПУ 16А20Ф3 с получаемым размером $\varnothing 35^{+0,025}$ мм (7 квалитет точности) и максимальным линейным износом резца $L_{max} = 0,14$ мм. В публикации были обозначены два типа производимых подналадок:

- а) подналадка с заменой инструмента и корректировкой размерной настройки станка.
- б) подналадка только с корректировкой размерной настройки станка.

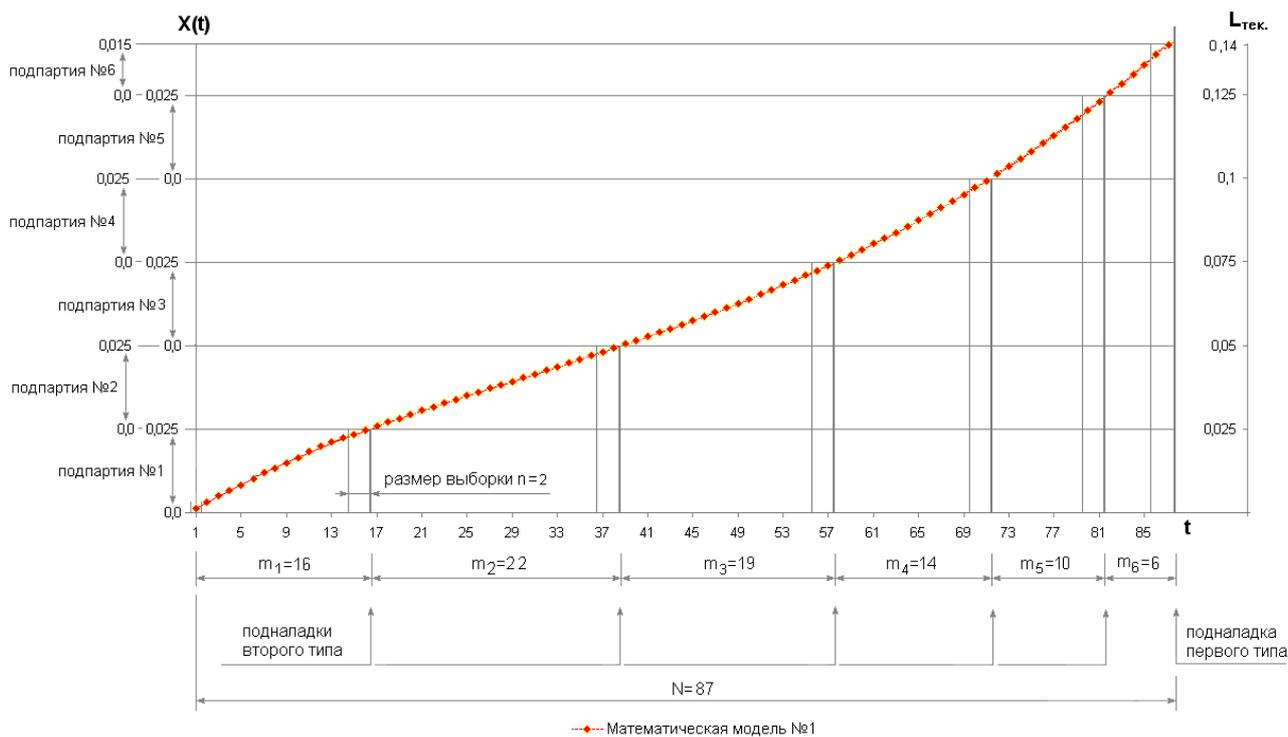


Рисунок 1 – График подналадок станка с ЧПУ совмещенный с графиком линейного износа резца.

Кроме этого в статье по девяти графикам кривой износа резца восстанавливалась обобщенная математическая модель, по которой определялись периоды подналадок второго типа между двумя соседними подналадками первого типа (рис. 1).

На рисунке отчетливо видно, что период между двумя соседними подналадками первого типа (размер партии) N равен 87 шт., а периоды между подналадками второго типа m_i или подпартии все различного размера. Это происходит вследствие различных участков на графике линейного износа резца.

Рассмотренная модель позволяет находить оптимальное количество коррекций размерной настройки станка, что в свою очередь позволяет полностью выработать его ресурс и минимизировать затраты на инструмент, что в сочетании с уменьшением затрат на текущий контроль продукции позволит найти более близкий к глобальному локальный минимум функции затрат на контроль и производство продукции (функции Z).

Вследствие сказанного, а так же широко известного факта, что износ режущего инструмента, а, следовательно, и наработка между подналадками первого типа подчиняется разбросу по закону Вейбула [1] необходимо уточнение модели размерной настройки станка в режиме реального времени, по новым данным, получаемым в процессе обработки в режиме реального времени.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Для уточнения параметров модели и оптимизации параметров используемой для статистического управления качеством КК предлагается использовать адаптивную систему коррекции размерной настройки станка с ЧПУ, использующую его измерительную систему для определения линейного износа резца. То есть после обработки очередной партии деталей производится текущий контроль выборки обработанных деталей и измерение текущего линейного износа резца $L_{тек.}$. Если $L_{тек.}$ меньше максимального линейного износа резца L_{max} , то производится подналадка первого типа, если же $L_{тек.} \leq L_{max}$, то производится подналадка второго типа.

Функциональная схема предлагаемой адаптивной системы, основанной на алгоритме определения параметров моделей (1, 2) и расчета параметров КК предложенном в [4], представлена на рисунке 2:

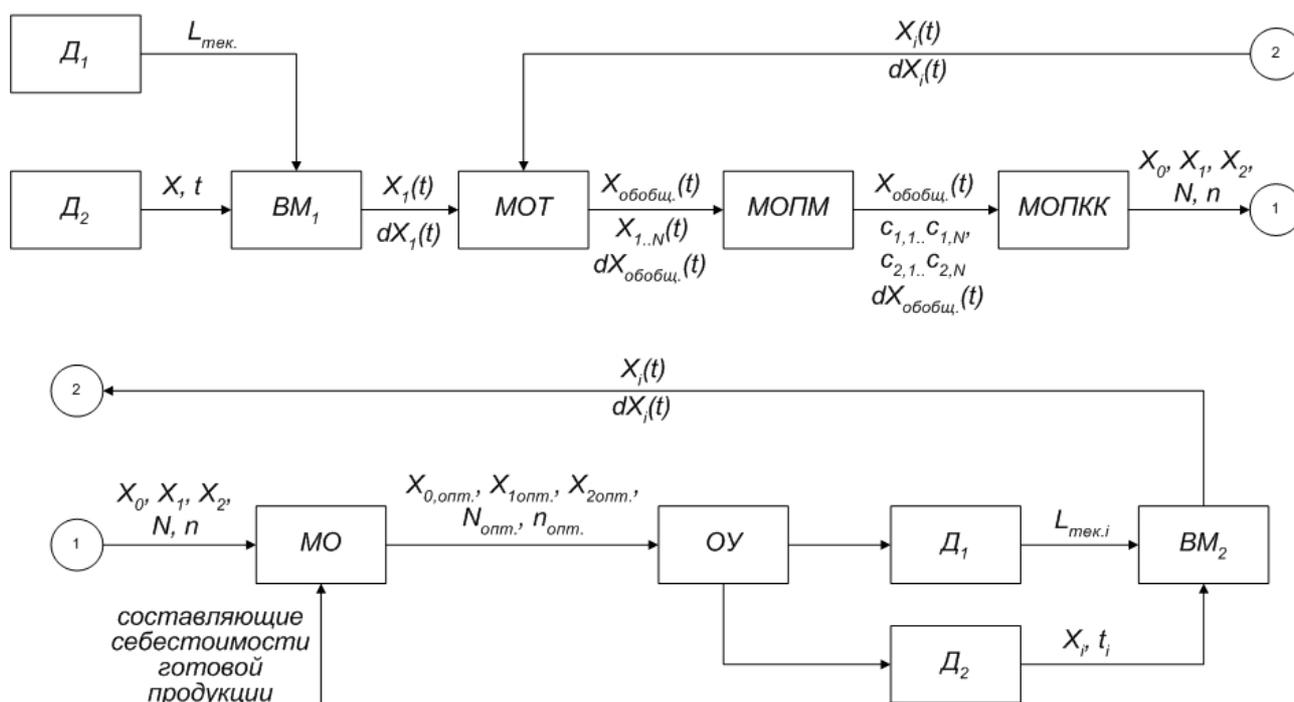


Рисунок 2 – Функциональная схема адаптивной системы определения и оптимизации параметров КК.

В первом блоке функциональной схемы адаптивной системы определения и оптимизации параметров КК (АСОиОПКК) D_1 – датчике, производится определение текущего линейного износа резца $L_{тек.}$, в роли данного датчика может выступать измерительная система станка с ЧПУ. Данные с D_1 вместе с данными поступающими с D_2 – датчика, производящий определение получаемого на станке размера X и номера детали t , в роли которого может выступать оператор оборудования, производящий измерение детали, поступают на вход вычислительного модуля №1 (BM_1), в котором на их основе производится определение начального тренда размерной настройки станка с ЧПУ $X_1(t)$ и, в соответствии с (2), функции разброса его значений $dX_1(t)$

Данные с BM_1 поступают в модуль определения тренда (MOT) размерной настройки станка в котором на основе начальных функций контролируемого параметра качества $X_1(t)$ и $dX_1(t)$, а так же трендов показателя качества $X_i(t)$ и $dX_i(t)$ количеством $Q-1$ шт. (где Q – совокупное количество используемых в процессе адаптивной оптимизации трендов показателя качества $X_i(t)$ и $dX_i(t)$) поступающих в режиме реального времени с вычислительного модуля №2 (BM_2) формируется обобщенный тренд размерной настройки станка с ЧПУ $X_{обобщ.}(t)$, а так же обобщенная функция разброса его значений $dX_{обобщ.}(t)$.

После этого в модуле определения параметров модели ($МОПМ$) размерной настройки станка, производится определение параметров c_1 и c_2 , для всех Q трендов контролируемого показателя качества. После этого совокупные данные поступают на вход модуля определения параметров контрольной карты ($МОПКК$), в котором на основании статистического подхода к управлению качеством продукции, а так же другой априорной информации назначаются предварительные параметры КК (X_1 – верхняя сигнальная граница (ВСГ); X_2 – нижняя сигнальная граница (НСГ); X_0 – уровень начальной настройки (УНН); n – размер выборки; N – периодичность взятия выборки), которые потом с учетом составляющих себестоимости готовой продукции оптимизируются в модуле оптимизации ($МО$).

Оптимизированные параметры контрольной карты в дальнейшем используются в процессе работы на станке, т.е. в объекте управления ($ОУ$), с которого в режиме реального времени снимаются значения текущего линейного износа резца $L_{тек.}$ (через датчик D_1), а так же получаемого на станке размера X и номера детали t , при котором данный размер был получен (датчик D_2).

Новые данные используются в $ВМ_2$ для получения новых трендов размерной настройки станка с ЧПУ $X_i(t)$ и $dX_i(t)$, которые поступают на вход МОТ и используются в процессе адаптации.

Примечание 1: Разработанная АСОиОПКК работает с достаточно большой точностью только при стабильных условиях обработки т.к. рассчитана на сглаживание колебаний стойкости инструмента и других параметров процесса резания, влияющих на период подналадки станка, что мало достижимо в условиях реального производства.

Данное обстоятельство можно учесть следующим образом: процедуру адаптации при управлении процессом обработки в режиме реального времени производить учитывая только Q последних функций $X_i(t)$ и $dX_i(t)$, а информация о более ранних функциях как устаревшую удалять из памяти СЧПУ станка.

Чем больше Q , тем консервативней алгоритм адаптации и он начинает реагировать только на долговременные изменения условий обработки. И, наоборот, чем меньше Q , тем быстрее будет реагировать процедура управления процессом подналадки станка на изменение этих условий. Следовательно, Q должно быть таким, чтобы сглаживать случайные колебания условий обработки, но учитывать их систематические изменения.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЬНОЙ КАРТЫ

Для оптимизации параметров КК по которым производится статистическое управление процессом подналадки станка с ЧПУ был разработан алгоритм базирующийся на экономическом критерии оптимальности: *минимизации затрат на текущий контроль и производство продукции.*

Идея метода состоит в том, что показатели процесса контроля многократно рассчитываются при различных выбранных значениях КК и выбирается тот вариант, при котором достигается минимум общей себестоимости (функции Z). Этот метод не гарантирует, что найденное решение дает глобальный оптимум функции т.к. для этого необходимо знание абсолютно точной модели показателя качества, что невозможно т.к. для этого значение выборки статистических данных должно стремиться к бесконечности. Однако, чем больше вариантов задания отмеченных параметров будет испытано, тем ближе полученное решение будет к глобальному оптимуму.

Существо алгоритма, для случая, когда производится сплошной контроль первой партии деталей, поясняет блок-схема, приведенная на рисунке 3. Случай же, когда первоначальная информация о контролируемом показателе качества будет отсутствовать, отличается от рассматриваемого только тем, что период стойкости резца (количество деталей обработанных между подналадками первого типа), а также период между корректировками размерной настройки станка вначале будет назначаться априорно.

Поясним некоторые блоки этой схемы:

В блоке 1 из предварительно подготовленного файла считывается первая партия значений размеров полученных на станке, а также значения составляющих себестоимости продукции.

В блоке 2 производится определение тренда показателя качества для обобщенной партии деталей включающей Q последних подпартий согласно (см. примечание 1, при этом первоначально $Q=1$ и обобщенная партия включает в себя только первую партию).

В блоке 3 производится определение трендов размерной настройки станка с ЧПУ для всех Q последних подпартий составляющих обобщенную партию, а также определение функций разброса получаемого на станке с ЧПУ размера от его математической модели $dX_i(t)$, также для всех Q последних подпартий и обобщенной партии.

В блоке 4 производится определение параметров c_1 и c_2 , для всех Q трендов контролируемого показателя качества.

В блоках 5-9 открываются циклы по всем параметрам КК, при этом:

а) УНН изменяется с шагом 0,001 (блок 5) в диапазоне:

$$X^- \leq X_0 \leq X^- + \frac{X^+ - X^-}{8},$$

б) ВСГ изменяется с шагом 0,01 (блок 6) в диапазоне:

$$X^- + \frac{X^+ - X^-}{2} \leq X_1 \leq X^+,$$

в) НСГ изменяется с шагом 0,01 (блок 7) в диапазоне:

$$X^- \leq X_2 \leq X^- + \frac{X^+ - X^-}{2},$$

в) минимальный размер партии деталей между подналадками первого рода, а также минимальный размер выборки при оценке двух параметров c_1 и c_2 равен 2.

В блоке 10 производится обнуление статистик количества исправимого брака – S_1 , количества неисправимого брака – S_2 , подналадок 1 вида – S_3 , подналадок 2 вида – S_4 , а также количества проконтролированных деталей – S_5

В блоке 11 производится моделирование значения размера, полученного на станке с ЧПУ $X(t)$, а так же определение текущего линейного износа резца по зависимости:

$$L_{\text{тек.}} = X(t) - X_0,$$

В блоке 12 полученное значение контролируемого параметра качества $X(t)$ сравнивается с ВСГ.

В блоке 13 полученное значение контролируемого параметра качества $X(t)$ сравнивается с НСГ.

В блоке 14, по условию блока 12, производится увеличение статистики количества исправимого брака.

В блоке 15, по условию блока 13, производится увеличение статистики количества неисправимого брака.

В блоках 16 и 17 полученное значение текущего линейного износа резца сравнивается с максимальным возможным линейным износом резца $L_{\text{max.}}$, а так же с полем допуска на получаемый размер D . Два условия необходимы т.к. возможно 3 случая соотношений $L_{\text{тек.}}$, $L_{\text{max.}}$ и D :

а) $L_{\text{тек.}} > D$ и $L_{\text{тек.}} > L_{\text{max.}}$ – подналадка 1 вида.

б) $L_{\text{тек.}} > D$ и $L_{\text{тек.}} < L_{\text{max.}}$ – подналадка 2 вида.

в) $L_{\text{тек.}} < D$ и $L_{\text{тек.}} < L_{\text{max.}}$ – продолжение моделирования без подналадки.

В блоке 18, по условию блока 16, производится увеличение статистики количества подналадок 2 вида.

В блоке 19, по условию блока 17, производится увеличение статистики количества подналадок 1 вида.

В блоке 20 производится увеличение статистики количества проконтролированных деталей.

В блоке 21 производится подсчет затрат на текущий контроль и производство продукции.

В блоке 22 производится сравнение затрат на текущий контроль и производство продукции полученных в блоке 21 с минимальными запомненными затратами. Если полученные в блоке 21 затраты меньше минимальных запомненных затрат то запоминаются параметры КК при которых они были получены (блок 23), а данный вариант параметров КК считается оптимальным.

В блоках 24-28 закрываются циклы по всем параметрам КК.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДНАЛАДКИ СТАНКА С ЧПУ

После определения оптимальных параметров КК по ним производится обработка следующей партии деталей. В процессе обработки этой партии в соответствии с примером изображенным на рисунке 1 было произведено 5 подналадок 2 типа и одна подналадка первого.

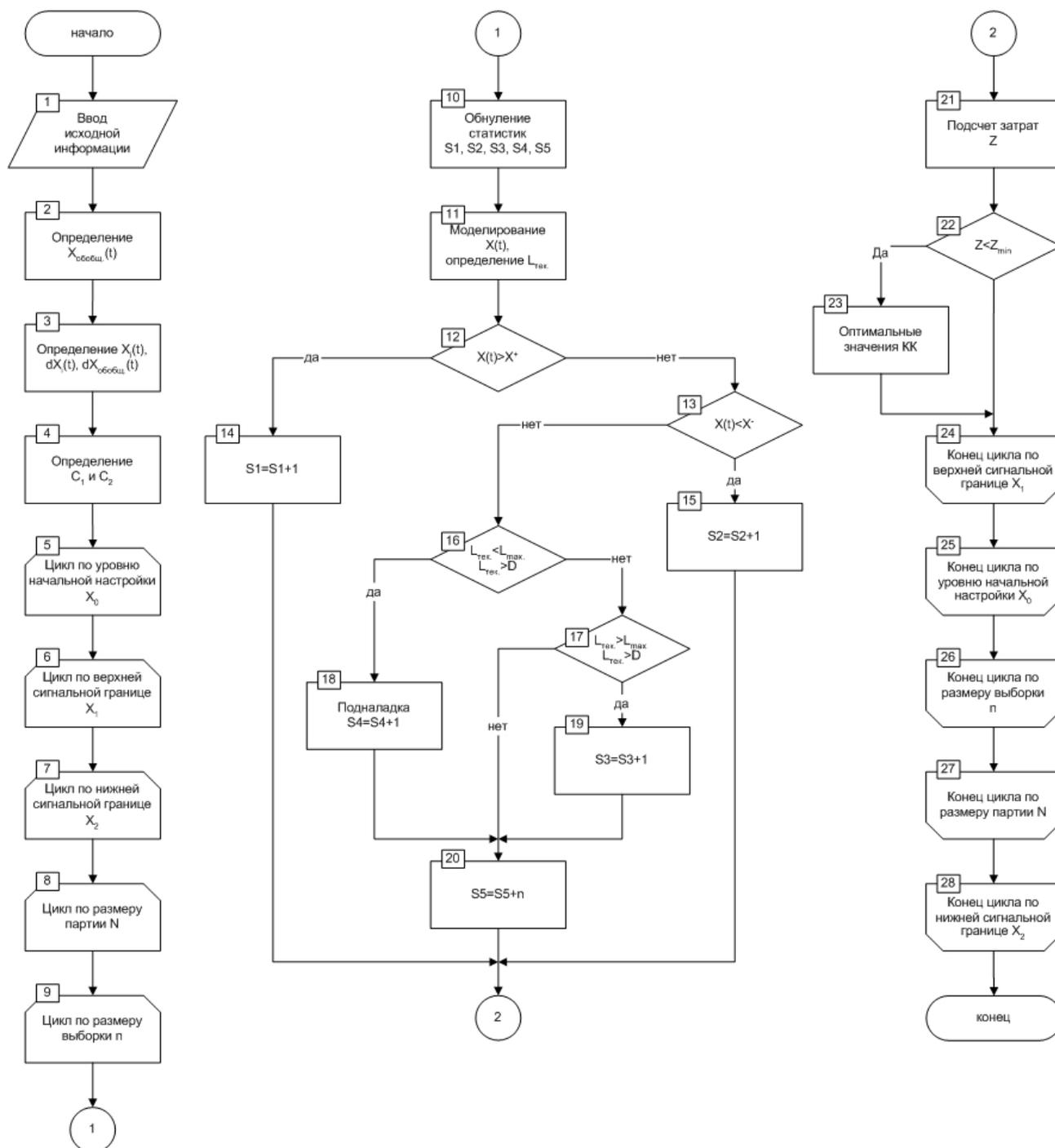
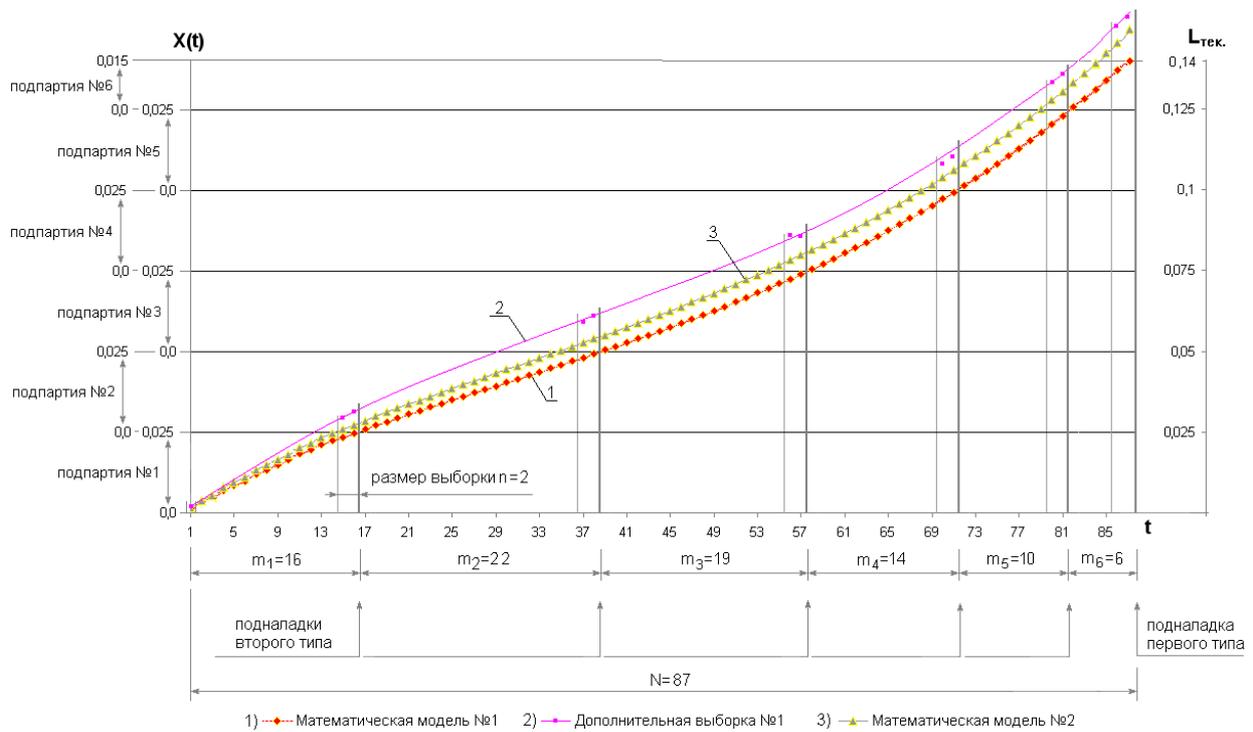


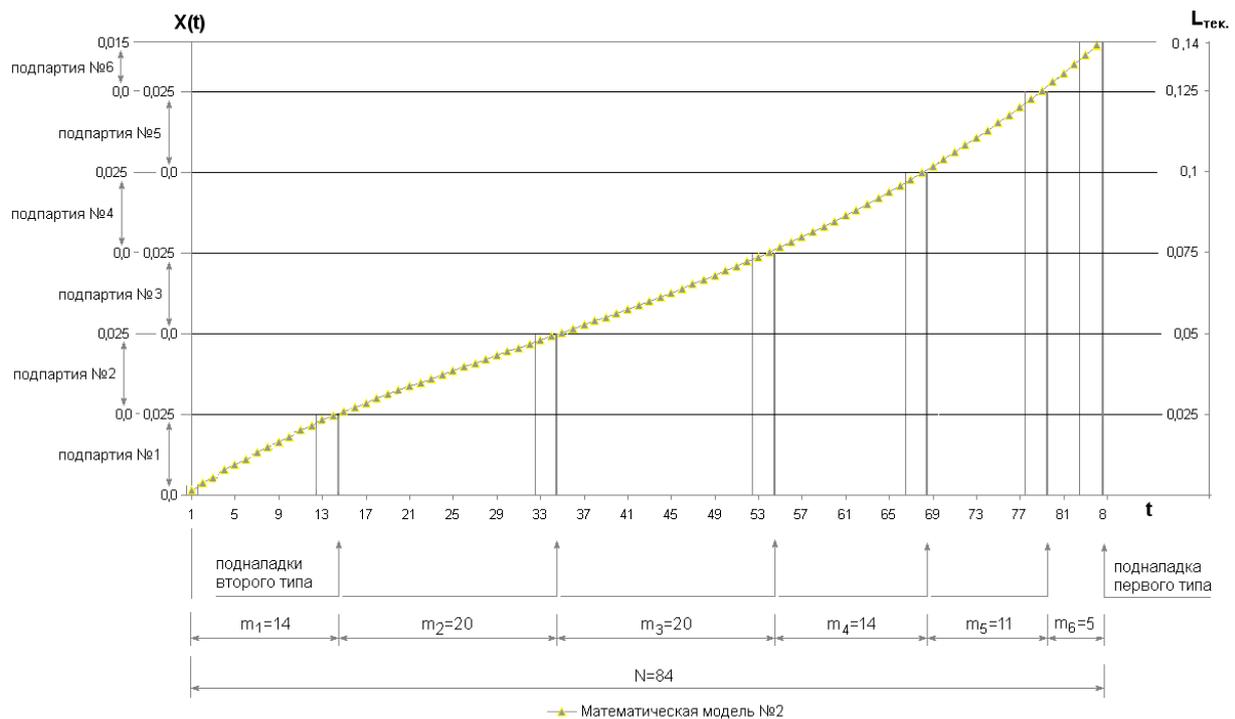
Рисунок 3 – Блок схема алгоритма оптимизации параметров КК.

Следовательно, в процессе обработки было проконтролировано 13 деталей: 2 при каждой подналадке и одна деталь в самом начале для проверки правильности настройки станка на обработку (это необходимо делать вследствие того что существует погрешность установки режущей пластинки, а также другие стохастические факторы которые могут вызвать возникновение брака при обработке первой детали).

На рисунке 4 показано, что новые данные (дополнительная выборка №1) располагаются на графике выше исходного тренда размерной настройки станка с ЧПУ (математическая модель (1)), что, после их обработки приводит к получению новой зависимости размера получаемого на станке с ЧПУ от номера детали, обрабатываемой после подналадки оборудования (математическая модель (2)), что вызывает изменение количества обработанных одной пластинкой деталей или периода стойкости T (при математической модели (1) $T=87$ шт., а при математической модели (2) $T=84$ шт.)



а)



б)

Рисунок 4 – График подналадок станка с ЧПУ совмещенный с графиком линейного износа резца после включения в обобщенную модель новых экспериментальных данных

Кроме этого произошло изменение периодов между корректировками размерной настройки станка: например в первоначальном случае (рис. 1) $m_1=16$ шт. (размер первой подпартии), а после обработки новой партии и получения тренда размерной настройки станка с ЧПУ №2 согласно модели (2) $m_1=14$ шт. (рис. 4, б).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработанная и описанная ранее в работах [4],[5] математическая модель тренда показателя качества размерной настройки на обработку станка с ЧПУ, учитывающая измене-

ние стойкости инструментальной пластинки при её замене во время подналадки станка, показала свою адекватность при адаптивном управлении оптимизацией параметров КК.

2. Разработана функциональная схема АСОиОПКК, производящей корректировку параметров модели, а так же параметров оптимизированной контрольной карты в режиме реального времени.

3. Разработан адаптивный алгоритм работы оборудования, производящий, при помощи измерительной системы станка с ЧПУ, определение текущего износа режущего инструмента, типа подналадки станка, а так же оптимизацию параметров КК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Интерпретация контрольных карт Шухарта [Текст] / Ю. П. Адлер, В. Л. Шпер // Методы менеджмента качества. – 2003. – С. 33-41.
2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Гостехиздат, 1956. – 610 с.
3. ГОСТ Р 50779.40-96. Статистические методы. Контрольные карты. Общее руководство и введение [Текст]. – Введ. 1997. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 20 с.
4. Картавец, И. С. Моделирование процесса подналадки станка с ЧПУ [Текст] / И. С. Картавец // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула : ТулГУ, 2012. – Вып. № 2. – С. 282-292.
5. Пасько, Н. И. Математическая модель контроля размерной настройки станка с ЧПУ по методу контрольной карты [Текст] / Н. И. Пасько, И. С. Картавец // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула : ТулГУ, 2012. – Вып. № 2. – С. 292-301.

Картавец Иван Сергеевич

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Аспирант кафедры «Автоматизированные станочные системы»
Тел. (4872) 23-95-39, 8-920-740-22-89
E-mail: ivan_2la@mail.ru

I.S. KARTAVTSEV

ADAPTIVE OPTIMIZATION OF THE IN-PROCESS NC MACHINE CONTROL AND ADJUSTMENT

The structure of an adaptive analysis and optimization parameters for the NC-produced dimension variation and its adjustment period using the machine's measurement system to determine the cutter's linear wear and based on the statistical quality management approach with inspection sheet has been considered.

Keywords: *batch size; corrective; adjustment type; linear wear; optimality test; inspection sheet.*

BIBLIOGRAPHY

1. Adler Yu.P. Schuhart's control cards interpretation Text. / Yu.P. Adler, V.L. Schper // Quality Management Methods, pp. 33-41, 2003.
2. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Mathematics Handbook for Engineers and Students of Higher Technical Colleges.- M.: State Tech. Publishing House, pp. 610, 1956.
3. Standard GOST P 50779.40-96, Statistical Methods. Control Cards. General Management and Introduction Text.- Introduction 1997.-M.: Publishing House of Standards, pp. 20, 1996.
4. Kartavtsev I.S. Simulation of numerically controlled machine tools setup procedure // Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences. Issue №2.- Tula: TulSU, pp. 282-282, 2012.
5. Pasko N.I., Kartavtsev I.S. Simulator of control of numerically controlled machine tool setup by control card method // Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences. Issue №2.-Tula: TulSU, pp. 292-301, 2012.

Kartavtsev Ivan Sergeevich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Phone. (4872) 23-95-39, 8-920-740-22-89
E-mail: ivan_2la@mail.ru

М.И. ТИМОШИН, С.Ф. ЗОЛОТЫХ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИИ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Рассмотрены методы и средства диагностики технического оборудования и возможности их применения к диагностике металлорежущих станков. Разработана методика использования динамических характеристик для сертификации токарных станков.

Ключевые слова: диагностика металлорежущих станков, частотно-спектральный анализ, сертификация, интегрированная система диагностики.

Для обеспечения безопасной эксплуатации ныне действующего оборудования все с большей остротой встает вопрос его технического диагностирования с целью определения остаточного ресурса. При эффективном диагностировании технического состояния металлорежущих станков (МРС) и своевременном принятии профилактических мер, затраты на технический осмотр и ремонт могут быть уменьшены на 20–25 %.

Бесперебойное и безотказное эксплуатирование станков обеспечивается качеством их технического состояния. Одним из важнейших показателей качественного состояния станка является динамическая характеристика его систем.

Проблема обеспечения заданного динамического качества является далекой от решения, что объясняется, прежде всего, ее сложностью и недостаточной изученностью. Эффективными способами обеспечения качества работы станочного оборудования являются оптимизация динамических параметров на этапе синтеза, или проектирования, применение виброзащитных систем и конструкций на этапе эксплуатации, диагностика и мониторинг технического состояния станков.



Рисунок 1 - Методы диагностирования станков и станочных комплексов

В связи с данной проблемой были рассмотрены и проанализированы методы диагностирования технического оборудования (рис. 1) и предложена схема сертификации токарных станков на основе использования динамических характеристик данных станков. Также приведена методика использования динамических характеристик для сертификации токарных станков.

Целью данной работы является повышение эффективности технического обслуживания (уменьшение времени и затрат на ремонт и обслуживание оборудования) за счет разработки и внедрения методических основ использования динамических характеристик для сертификации токарных станков

В России законодательно установлено, что некоторые группы продукции должны быть сертифицированы обязательно, без сертификата их просто нельзя выпускать в обращение. К такой продукции относятся и металлообрабатывающие станки, в том числе и металлорежущие, они включены в Номенклатуру продукции, в отношении которой законодательными актами Российской Федерации предусмотрена обязательная сертификация продукции.

Металлорежущие станки должны проверяться на соответствие требованиям технического регламента, но пока такой документ не создан, проверяется выполнение положений стандартов или технических условий, если они относятся к безопасности станков. При этом проверяется электробезопасность, конструктивная безопасность и электромагнитная совместимость. Кроме того, установлены и проверяются показатели энергоэффективности, уровни шума, вибрации, содержания в воздухе вредных веществ и эргономические параметры.

На данный момент одной из немаловажных проблем диагностики МРС является нехватка сертификационных показателей о диагностике МРС в паспорте станка.

В работе рассматривается частотно-спектральный метод диагностики технического состояния (ТС), как наиболее информативный и эффективный метод, который позволяет оценивать любые динамические колебания в станках. Этот метод получил широкое распространение во многих отраслях промышленности. Минусом этого метода является недостаточная изученность. Ограничение возможностей применения из-за отсутствия опорных (эталонных) спектров частот для сравнения с полученными в ходе диагностики.

Для исследования частотно-спектральных характеристик шпиндельного узла токарного станка была выбрана автономная портативная система оценки вибрационного состояния технических объектов PDM 2106 (рис. 2). Коллектор данных PDM 2106 представляет собой малогабаритный блок с автономным питанием, позволяющий осуществлять ввод и запись в энергонезависимую память временных реализаций вибросигналов, отражающих механические колебания объекта в контрольных точках (рис. 3).



Рисунок 2 – Портативная система PDM-2106

Область применения частотно-спектрального метода диагностики: проведение экспресс-анализа технического состояния станка; определение и при необходимости повышение технологической точности станка; определение дефектов (в том числе скрытых) и устранение их на этапе возникновения; прогнозирование износа узлов и деталей станка; планирование сроков проведения ремонта, заказа комплектующих и запчастей для ремонта.

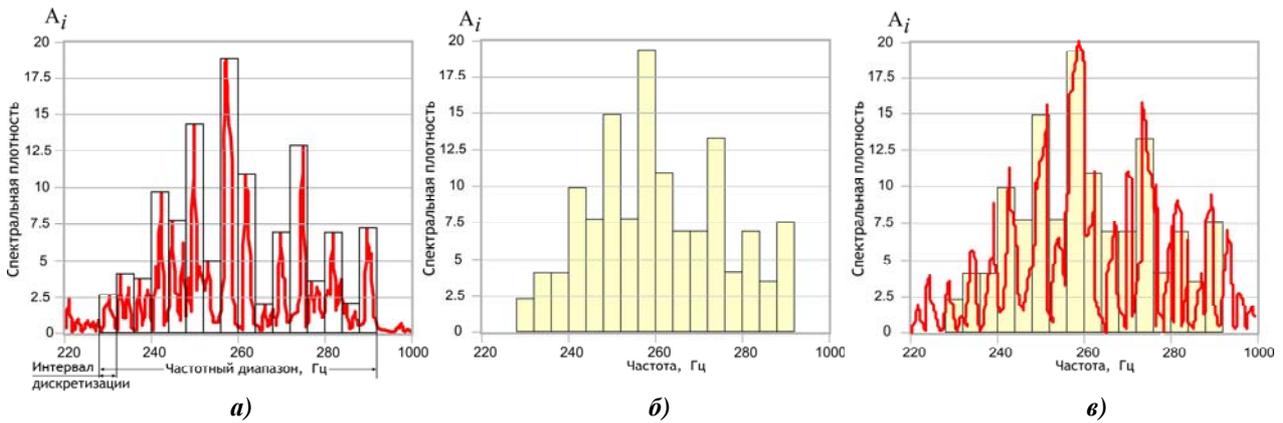


Рисунок 3 - Спектры вибрации шпиндельного узла (ШУ) токарного станка
 а) эталонный спектр частот, снятый с ШУ нового станка; б) эталонный диапазон;
 в) спектр частот, снятый с ШУ станка отработавшего некоторое время

Таким образом, встает вопрос о выявлении числа необходимых датчиков. Эта тема является актуальной для понижения себестоимости и повышения надежности систем диагностики и наблюдения. Одним из способов решения подобной задачи является разработка математической модели для описания связи между случайными процессами, фиксируемыми датчиками и выбор числа необходимых датчиков, руководствуясь оценкой степени близости по критерию среднего квадрата ошибки.

Имея данные, взятые с датчиков оперативного контроля, попробуем установить динамические характеристики, определяющие характер связи между информацией с различных датчиков.

Поскольку структурная конфигурация системы считается неизвестной и относительно нее не делается никаких предположений, задача идентификации сводится к поиску решения в функциональном пространстве, то есть пространстве функционалов, описывающих систему.

В. Вольтерра впервые использовал для описания зависимости между входным и выходным сигналами нелинейной системы степенные ряды, членами которых являются функционалы. Фактически, ряд функционалов Вольтерра, состоящий из членов, зависящих от входного сигнала $x(t)$:

$$y(t) = k_0 + \int_0^{\infty} k_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 +$$

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1d\tau_2d\tau_3 + \dots$$

или

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} k_n(\tau_1 \dots \tau_n)x(t-\tau_1) \dots x(t-\tau_n)d\tau_1 \dots d\tau_n$$

является обобщением представления линейной системы интегралом свертки.

Таким образом, применение корреляционного анализа позволяет оценить целесообразность использования нескольких датчиков при диагностике технической системы.

Выбран принцип построения систем вибродиагностики и прогнозирования.

В устройствах прогнозирования виброреологических процессов производится аппаратная реализация алгоритмов и определение τ_{\max} , для которого выполняется условие $g(\tau) = 1$. В качестве примера рассмотрим устройство, в котором осуществляется следующий алгоритм прогнозирования:

$$g(\tau) = e \left\{ \left[\sum_k e^{(z_{mk}(0) - \Delta_k)} \right] \left[\sum_i \beta_j(\tau)^i \right] - D \right\} \quad (1)$$

В данном устройстве на основании измерений амплитуд вибрации для $\tau = 0$ и сравнения с Δ_k определяется параметр $g(\tau)$ и находится временная характеристика τ_{\max} , определяющая параметрическую надежность рассматриваемой системы. Время τ_{\max} оценивается как временной интервал от момента $t = 0$ до момента, когда изменяющееся значение

$$\left[\sum_k e^{(z_{mk} - \Delta_k)} \right] \times \left[\sum_i \beta_j(\tau)^i \right] \quad (2)$$

станет не меньше параметра D .

Используя совместное функционирование устройств диагностики и прогнозирования виброреологических процессов, можно диагностировать такие параметры как переменные и уводящие моменты, нестабильность эксплуатационных параметров и параметрический ресурс.

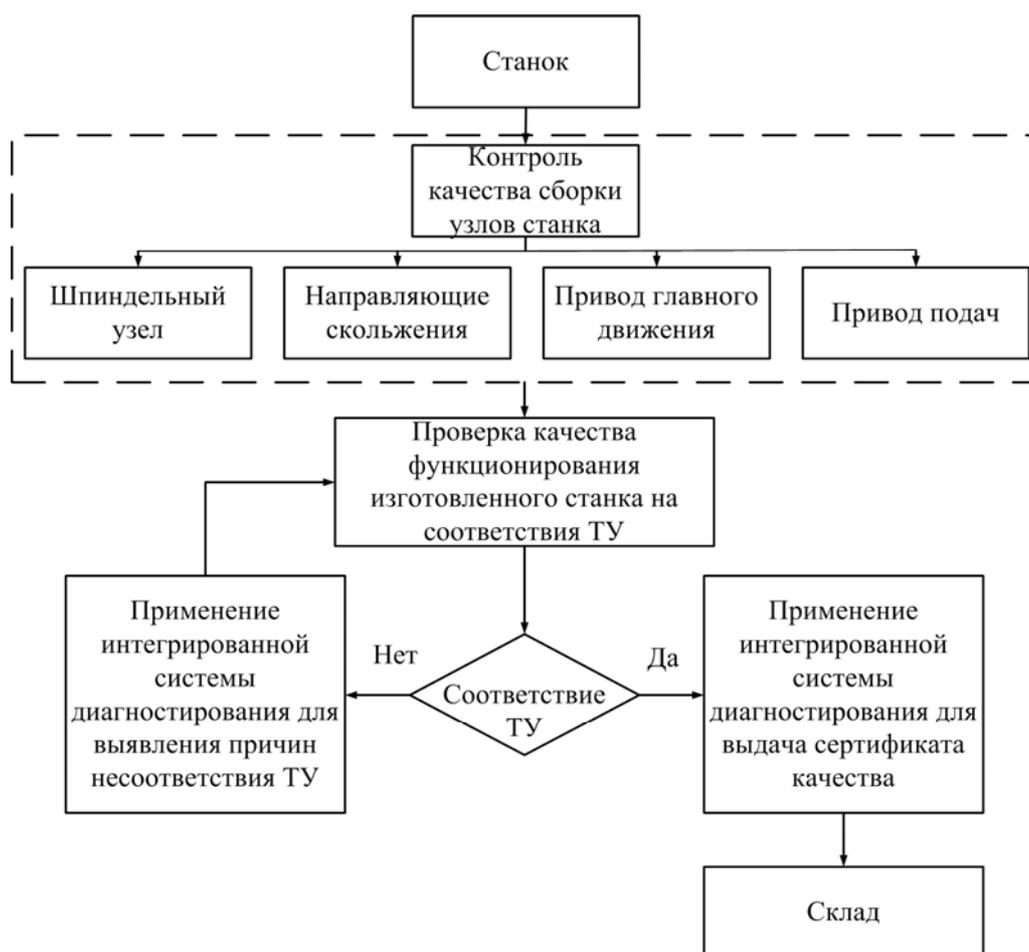


Рисунок 4 – Интегрированная система диагностирования технологического оборудования

Новый станок на заводе изготовителе проверяется на соответствие ТУ согласно блок-схеме с применением интегрированной системы диагностирования технологического оборудования в соответствии с рисунком 4 по принятой на данном предприятии методике для контроля качества сборки узлов и станка в целом. Если несоответствий не обнаружено, то системой выдается сертификат качества с отправкой станка на склад. В случае обнаружения несоответствия станка ТУ применяют интегрированную систему диагностирования для их выявления. После устранения неисправности и повторной проверки системой выдается сертификат качества, и новый станок отправляется на склад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая диагностика и ремонт компрессоров [Текст] / Н. А. Ястребова [и др.]. – М. : ЦНИИТЭхимнефтемаш, 1991. – Ч.2. – 60 с.
2. Максименко, С. В. Методы и средства технической диагностики оборудования компрессорной станции. Обзорная информ [Текст] / С. В. Максименко, Г. Н. Поляков, А. Н. Труфанов // Сер. «Транспорт и подземное хранение газа». – М. : ВНИИЭгазпром, 1990. – 66 с.
3. Явленский, А. К. Теория динамики и диагностики систем трения качения [Текст] / А. К. Явленский, К. Н. Явленский. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1978. – 184 с.

Тимошин Максим Игоревич

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Магистрант кафедры «Автоматизированные станочные системы»
Тел. 8-920-270-39-36
E-mail: Maxtrock71@mail.ru

Золотых Сергей Федорович

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
Кафедра «Автоматизированные станочные системы»
Канд.техн.наук
Тел. (4872) 35-18-87; 8-920-740-75-33

M.I. TIMOSHIN, S.F. ZOLOTIX

DEVELOPMENT OF METODOLOGY PRINCIPLES OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CERTIFICATION FOR LATHES

The methods and means of diagnostics of technical equipment and possibilities of their application to the diagnosis of machine tools. The technique of dynamic characteristics for the certification of lathes.

Keywords: diagnosis of machine tools, frequency-spectrum analysis, certification, integrated diagnostic system.

BIBLIOGRAPHY

1. Yastrebova N.A., et alii. Technical Diagnostics and Repair of Compressors.-M.: CRTA Chemnaph-thatemach, Part 2, pp. 60, 1991.
2. Maximenko S.V., Polyakov G.N., Trufanov A.N. Methods and means of technical diagnostics of compressor station equipment. Survey information. Set "Transport and Gas Underground Storage".-M.: RRIGasprom, pp. 66, 1990.
3. Yavlensky A.K., Yavlensky K.N. Theory of Dynamics and Diagnostics of Resistance to Rolling Systems. L.: Publishing House of LSU, pp. 184, 1978.

Timoshin Maxim Igorevich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Phone: (4872)351887; 8-920-270-39-36
Email: Maxtrock71@mail.ru

Zolotih Sergey Fedorovich

FSBEI HVT «Tula State University», Tula
Department: Automated Manufacturing Systems
Can.Sc.tech.
Phone: (4872)351887; 8-920-740-75-33

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Симаков А.А.
Компьютерная верстка Симаков А.А.

Подписано в печать 15.10.2012 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10,3.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.