ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УНПК

Научно – технический журнал
Издается с 1995 года
Выходит шесть раз в год
№ 2 - 5 (292) 2012
Март - апрель

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

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.*
ИвановаТ.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.*
Малинин 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:
Морозова А.В. *к.с.н.*

Адрес редакции
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

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

Подписной индекс **29504**
по объединенному каталогу «**Пресса России**»

© Госуниверситет – УНПК, 2012

Содержание

Машиностроительные технологии и инструменты

Васильев А.С., Грязев В.М. **Определение характеристик поверхностного слоя деталей, обработанных различными способами** 3
Гончаров Е.В., Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. **Комбинированное разделение металлов в электрическом поле** 7
ЕРенков О.Ю., Битюцкая Е.А., Химухин С.Н. **Новый способ формования стеклопластиковых изделий из эпоксидной смолы** 12
Золотухина О.Л., Федоров Ю.Н. **Анализ погрешностей формы зубьев цилиндрических колес при зубонарезании по методу обката** 17
Куликов М.Ю., Рыгин Р.Е. **Изучение закономерностей формообразования при хонинговании высокоточных отверстий в труднообрабатываемых сплавах** 23
Маслов А.В., Маслов А.А. **Технологические возможности электрохимической обработки титановых сплавов в водно-ацетамидных электролитах** 26
Мигранов М.Ш. **Износостойкость режущего инструмента с наноструктурным покрытием** 32
Ракунов Ю.П. **Основные научные принципы разработки системы многоуровневой базовой технологии** 37
Сотников В.И. **Алгоритм минимизации погрешности формообразования эвольвентной поверхности при огибающем зубофрезеровании** 44
Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. **Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды** 53
Фоменко Р.Н. **Методика назначения технологических условий обработки ответственных деталей с учетом износостойких покрытий режущего инструмента при точении** 63

Моделирование технологических процессов

Иванов В.П. **Синтез алгоритмов особого управления динамическими системами методом огибающих** 69
Куликов Д.Д., Голодный Н.В. **Создание многоагентной среды технологического назначения** 76

Конструирование, расчеты и материалы

Гордон В.А., Кравцова Э.А. **Методика определения спектра частот изгибных колебаний балки с разноуровневыми продольными расслоениями** 84
Уткин Г.И., Марков В.В. **Особенности процесса трения рабочих поверхностей деталей контактной пары разъёмного электрического соединителя** 92

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

Корячкин В. П., Николаева М.А., Матвеева Т.В., Сапронова Н.П. **Реологические характеристики крекерного теста повышенной пищевой ценности** 98
Родичева М.В., Абрамов А.В., Уваров А.В., Татаринова Г.Ю. **Устройство для исследования процессов комбинированного теплообмена в биотехнической системе «человек – одежда – окружающая среда»** 104

Испытание, контроль, диагностика и управление качеством

Анцева Н.В., Пасько Н.И. **Управление качеством ремонтного обслуживания технологического оборудования с периодическим контролем состояния** 112
Иваненко А.Г., Пузанов В.Е. **Основные положения динамики качества продукции** 119
Иноземцев А.Н., Анцев В.Ю. **Разработка организационно-технологической структуры производственного процесса на основе квалиметрической оценки межцеховых технологических маршрутов** 125

Инновации и кадры в машиностроении

Киричек А.В., Морозова А.В. **Моделирование процедуры оценивания уровня социально-профессиональной компетентности специалиста машиностроительного профиля в условиях рынка труда** 134

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных ВАК, для публикации трудов на соискание ученых степеней.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УНПК

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

№ 2 - 5 (292) 2012
March - April

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 Commitee
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:
Morozova A.V. *Can. Sc. Soc.*

Address
302020 Orel,
Naugorskoye Chossee, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, 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

Machine building technology and toolware

Vasilev A.S., Grjazev V.M. ***Definition of characteristics superficia of the layer of details, processed in the various ways*** 3
Goncharov E.V., Smolentsev V.P., Kirillov O.N. ***Combined separation of metals in an electric field*** 7
Erenkov O. Ju., Bitutskaya E.A., Khimukhin S.N. ***New method of fiberglass plastic details forming from plastic binder*** 12
Zolotukhina O.L., Fyodorov Yu.N. ***Spur gear teeth shape errors analysis for generating tooth-cutting process*** 17
Kulikov M.U., Rygin R.E. ***Studying of regularities of a shaping at a honing of high-precision openings in hard-processing alloys*** 23
Maslov A.V., Maslov A.A. ***Technological capabilities of the electrochemical machining of titanium alloys in aqueous-acetamid electrolytes*** 26
Migranov M.Sh. ***Wear resistance of the cutting tool with a nano-structural cover*** 32
Rakunov Yu.P. ***The scientific foundation and principles of multitier basic technology system design*** 37
Sotnikov V.I. ***Algorithm for minimizing the inaccuracy shaping involute surface in envelope gear milling*** 44
Stepanov Y.S., Barsukov G.V., Mikheev A.V. ***Effect of the parameters of flow supersonic waterjet jets to geometrical form of surface destruction of barriers*** 53
Fomenko R.N. ***The methodology election of machining conditions for turning with coated tools of critical parts*** 63

Process modeling

Ivanov V.P. ***Synthesis of the algorithms for dynamic systems singular control with the envelope method*** 69
Kulikov D.D., Golodnyy N.V. ***Creating a technologycal multi agent system*** 76

Construction, calculation, material

Gordon V.A., Kravtsova E. A. ***Method for determining the spectrum bending frequency beam with multilevel longitudinal bundle*** 84
Utkin G.I., Markov V.V. ***Peculiarities process of friction the working surfaces of elements the contact pair of prefabricated electrical connector*** 92

Machine, apparatus, technology light and food industry

Koryachkin V.P., Nikolaeva M.A., Matveeva T.V., Sapronova N.P. ***Rheological characteristics of high food cracker test values*** 98
Rodicheva M.V., Abramov A.V., Uvarov A.V., Tatarinova G.I. ***Device for research of processes of combined heat exchange in biotechnical system «the person – clothes – environment»*** 104

Tests, control, diagnostics and quality control

Antseva N.V., Pasko N.I. ***Quality management of maintainance of manufacturing equipment with periodical state control*** 112
Ivakhnenko A.G., Puzanov V.E. ***Basic provisions of a product quality dynamics*** 119
Inozemtsev A.N., Antsev V.Y. ***Development of organizational and technological structure of production process based on qualimetric measurement of interplaint workflow*** 125

Innovation and personnel in engineering

Kirichek A.V., Morozova A.V. ***The machine-building cross-section specialist's competitiveness socially-professional level estimation procedure modelling*** 131

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of thesises for competition the academic degrees.

УДК 621.79; 621.9

А.С. ВАСИЛЬЕВ, В.М. ГРЯЗЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Рассмотрены сравнительные характеристики поверхностной жесткости стыков деталей, обработанных шлифованием, фрезерованием и слесарным способом. Показано, что наименьшую стабильность параметров жесткости имеют поверхности, обработанные слесарным способом.

Ключевые слова: *жесткость, поверхностный слой, шероховатость, опорная кривая.*

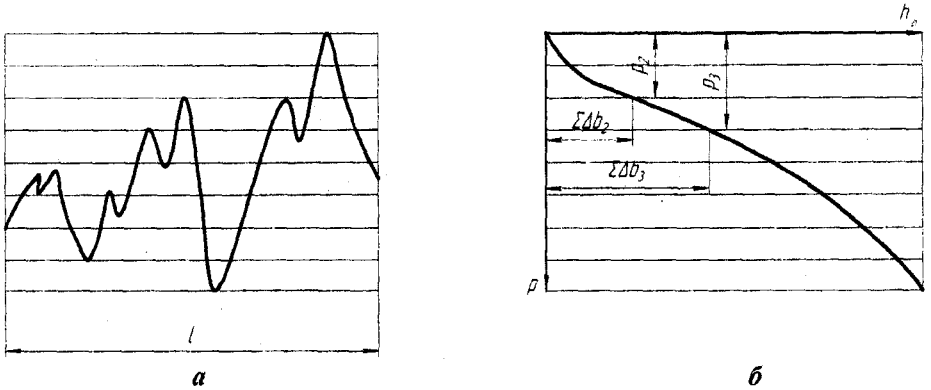
Работа многих машин сопряжена с большими нагрузками, которые воспринимаются исполнительными поверхностями деталей. Это находит определенное отражение в технических условиях на сборку механизмов и в процедуре их отладки. Как правило, наряду с назначениями допусков на линейные и угловые размеры, предъявляются требования к обеспечению высокой контактной жесткости стыков, для чего нормируется контакт между сопрягаемыми поверхностями. В свою очередь это обстоятельство предопределяет неизбежность ручных пригоночных работ.

Применяемая в производстве ручная пригонка, как правило, обеспечивает выполнение требуемой точности оборки, однако дает значительный разброс точности изделий. Поэтому потребовалось оценить контактную жесткость поверхностей, обработанных слесарным путем, и сопоставить их с аналогичными параметрами поверхностей, обработанных на металлорежущих станках.

Контактная жесткость деталей определяется качеством сопрягаемых поверхностей, причем в значительной мере она зависит от микрогеометрии шероховатой поверхности [1, 2, 3]. Важнейшей характеристикой топографии поверхности является опорная кривая, показывающая характер распределения материала в поверхностном слое. Опорная кривая может быть построена на основании профилограмм, снятых с исследуемой поверхности.

Если взять сечение профиля на некотором расстоянии p от линии выступов (рисунок 1), то сумму длин отрезков сечений выступов Δb_i на заданном уровне называют опорной длиной профиля

$$\eta_p = \sum_{1}^{n} \Delta b_i .$$



а *б*

Рисунок 1 - Построение опорной кривой: а - профилограмма, б - график опорной кривой

Отношение опорной длины профиля к базовой длине называется относительной опорной длиной профиля t_p на уровне p. Следовательно, имеют место равенство [1,2]:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{A_p}{A_c}, \quad (1)$$

где A_p - площадь сечения шероховатого слоя (на уровне p);

A_c - площадь исследуемого участка поверхности.

Из этого следует, что относительная опорная длина профиля равна относительной площади сечения материала шероховатого слоя на некотором уровне. Кривая, выражающая зависимость A_p от p, называется кривой опорной поверхности, которая наглядно показывает, какую долю занимает материал в шероховатом слое на каждом уровне (рисунок 1). Построение таких кривых было предложено американцем Абботом в 1934 г. [3].

Для того чтобы профилограмма отражала изменение шероховатости как в продольном, так и в поперечном направлении, съем ее производятся под углом в 45° к направлению обработки [2]. Имеющаяся профилограмма (рисунок 1, а) ограничивается двумя параллельными линиями. Одна из них проходит через вершину наибольшего выступа, другая - через крайнюю точку наиболее глубокой впадины. Расстояние между ними разбивается на несколько равных частей рядом горизонтальных линий.

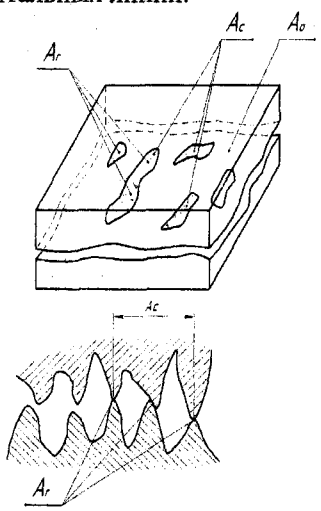


Рисунок 2 - Номинальная - A_a, контурная - A_c и фактическая - A_r площади контакта

Последние параллельны основанию профиля, который делится на ряд уровней. Каждому уровню соответствует некоторое сближение, равное расстоянию от вершины наибольшего выступа до данного уровня. Откладывая по оси абсцисс суммированные участки, ограничивающие ширину выступов, а по оси ординат - сближение, получают кривую опорной поверхности (рисунок 1, б), которая является графическим выражением зависимости суммарной площади сечений выступов на некотором уровне от величины сближения. Опорную кривую можно выражать в относительных величинах. Тогда по оси абсцисс откладывается отношение площади сечения на данном уровне A_s к контурной площади A_c (рисунок 2), а по оси ординат - отношение сближения a к максимальной высоте неровностей $R\max$. Относительная площадь сечения материала на некотором уровне обозначается - η_s, а относительное сближение - ε.

Несущая способность поверхности определяется параметрами b и - ν начального участка опорной кривой, которая приближенно описывается уравнением [2]

$$\eta_s = b\varepsilon^{\nu}, \quad (2)$$

где η_s - относительная площадь сечения материала;

ε - относительное сближение.

Формула (2) очевидно будет справедлива при условии $0 \le \eta_s \le 0{,}5$. Значение параметров b и ν может быть определено с помощью опорной кривой, полученной снятием и обработкой профилограмм. Для этой цели начальную часть кривой спрямляют, строя ее в логарифмических координатах. Прологарифмировав формулу (2), получим уравнение прямой

$$\lg \eta_s = \lg b + \nu \lg \varepsilon .$$

Построив эту прямую в логарифмических координатах, найдем коэффициент ν, равный тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс, а $\lg b$ - отрезку, отсекаемому данной прямой на оси ординат при $\varepsilon = 1$. Поскольку в интервале $1 > \eta_s > 0{,}5$ формула (2) теряет справедливость, то её рекомендуют заменить на указанном интервале следующей зависимостью [2]:

$$\eta_s = 1 - b(1-\varepsilon)^{\nu} .$$

Параметры опорной кривой выражаются через характеристики профиля [1,2,3], т.е.:

$$\nu = 2t_m\left(\frac{Rp}{Ra}\right) - 1;$$

$$b = t_m\left(\frac{R\max}{Rp}\right)\nu,$$

где t_m - относительная опорная длина на уровне средней линии;

Rp - высота сглаживания (нивелирования) - расстояние от линии выступов до средней линии в пределах базовой длины;

Ra - среднее арифметическое отклонение профиля;

$R\max$ - наибольшая высота неровностей профиля.

Формулы (2) и (3) являются приближенными и действуют в начале и конце рассматриваемых участков, соответственно, а в середине рассматриваемого интервала они теряют достоверность.

По расположению опорных кривых и по значению их параметров b и ν можно проводить сравнение несущей способности поверхностей.

Так, установлено, что с возрастанием коэффициента b она, как правило, увеличивается [1, 2]. В работе Суслова А.Г. [4] даются сведения о значениях параметров b и ν для типовых процессов чистовой обработки поверхностей.

Для исследования влияния способов обработки поверхностей деталей автоматических машин на контактную жесткость и устойчивость стыков деталей при сборке узлов использовались плоские образцы из стали, закаленные до твердости HRC 40...45. Исследуемые поверхности подвергались обработке следующими способами (Rz = 10...15 мкм):

а) получистовым шлифованием периферией круга;

б) цилиндрическим фрезерованием;

в) личным напильником с перекрестными (под 45°) движениями.

Профилограммы исследуемых поверхностей образцов снимались на профилографе-профилометре модели 252 завода "Калибр". Ниже (рисунок 3) представлены образцы профилограмм, снятых с поверхностей, обработанных слесарным способом личным напильником.

После обработки профилограмм были получены конкретные значения параметров b и ν опорных кривых, которые сведены в таблицу.

Из сравнения параметров опорных кривых поверхностей образцов, обработанных различными способами, и соответствующих им коэффициентов, следует, что контактная жесткость поверхностей, обработанных слесарным путем, не уступает в некоторых случаях контактной жесткости поверхностей, обработанных на станках, но имеет меньшую (в 1,3 -

1,5 раза) стабильность (устойчивость). Это обстоятельство можно объяснить тем, что поверхности, обработанные вручную, имеют резко выраженную нерегулярную шероховатость.

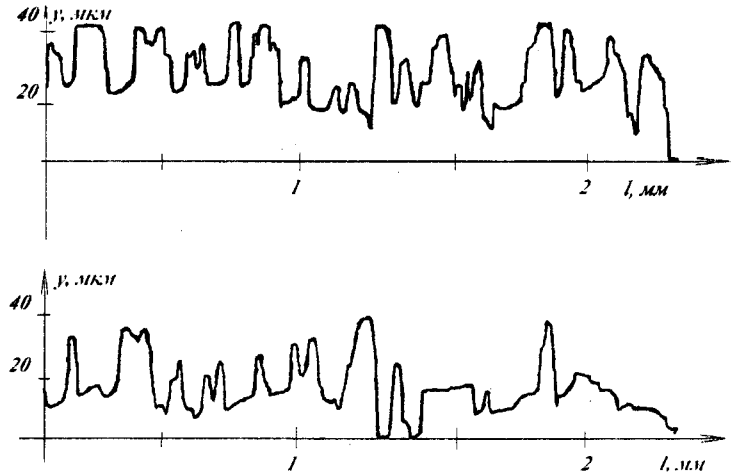


Рисунок 3 - Образцы профилограмм, снятых с поверхностей, обработанных личным напильником

Таблица - Опытные значения параметров опорных кривых b и ν для различных способов обработки

№№ опытов ⇒		1	2	3	4	5	6
Способ обработки	параметр						
шлифование	b	2,82	2,9	2,5	1,95	1,85	3,0
	ν	1,62	1,41	1,56	0,98	0,92	1,76
фрезерование	b	2,63	2,0	2,1	2,5	2,5	1,9
	ν	1,5	2,45	2,11	1,86	1,58	1,66
слесарная обработка	b	1,7	1,31	3,33	2,1	1,66	1,7
	ν	2,78	2,6	2,9	1,8	2,0	2,11

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин [Текст] / Э.В. Рыжов. - М.,1966. - 195 с.

2.Демкин, Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей [Текст] / Н.Б. Демкин. - М., 1970. - 227 с.

3.Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. - М., 1981. - 224 с.

4.Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей [Текст] / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 1987. - 208 с.

Васильев Александр Сергеевич
доктор техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Технология машиностроения»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел. (499) 263-65-08
E-mail: vas@bmstu.ru.

Грязев Василий Михайлович
студент кафедры «Технология машиностроения»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Тел. 8-961-1477117
E-mail: gryazev.vasya@gmail.com

A.S. VASILEV, V.M. GRJAZEV

DEFINITION OF CHARACTERISTICS SUPERFICIA OF THE LAYER OF DETAILS, PROCESSED IN THE VARIOUS WAYS

Comparative characteristics of superficial rigidity of joints of the details processed by grinding, milling and metalwork way are considered. It is shown that hundred-bilnost parameters of rigidity the surfaces processed by a file have the least.

***Keywords**: rigidity, a blanket, a roughness, a basic curve.*

BIBLIOGRAPHY

[1]Ryzhov, E.V. Contact rigidity of details of cars [Text] / E.V. Ryzhov. - M., 1966. - 195 p.

[2]Demkin, N.B. Kontaktirovanie of rough surfaces [Text] / N.B. Demkin. - M., 1970. - 227 p.

[3]Demkin, N.B. Qualit surfaces and contact of details of cars [Text] / N.B. Demkin, E.V. Ryzhov. - M., 1981. - 224 p.

[4]Suslov, A.G. Technological maintenance of parameters of a condition poverhno-stnogo a layer of details [Text] / A.G. Suslov. - M: Mechanical engineering, 1987. - 208 p.

Vasilev Alexander Sergeevich
The doctor техн. Sciences, the professor,
The manager. Chair «Technology of mechanical engineering» MGTU of AD Bauman
Ph. (499) 263-65-08
E-mail: vas@bmstu.ru.

Grjazev Vasily Mihajlovich
The student of chair «Technology of mechanical engineering» MGTU of AD Bauman
Ph. 8-961-1477117

УДК 371.261

Е.В. ГОНЧАРОВ, В.П. СМОЛЕНЦЕВ, О.Н. КИРИЛЛОВ

КОМБИНИРОВАННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В статье рассматривается процесс комбинированного разделения металлов гидроабразивным методом совместно с анодным растворением поверхности разделения, приведено экспериментальное подтверждение работоспособности способа.

***Ключевые слова:** гидроабразивное разделение материалов, шаржирование, качество поверхностного слоя, комбинированная обработка, анодное растворение.*

ВВЕДЕНИЕ

В заготовительном производстве начали широко использовать гидроабразивное разделение материалов, что позволило выявить следующие преимущества [1]:

- отсутствует термическое влияние на разрезаемый материал, так как генерируемое в процессе резки тепло практически мгновенно уносится водой;
- высокое качество получаемых кромок, не требующих дополнительной обработки;
- имеется возможность разрезать пакеты, состоящие из нескольких слоев разнообразных материалов;
- возможность обработки материалов сложных контуров, в том числе с волнистой поверхностью;
- небольшая ширина реза;
- имеется возможность начать резание материала в любой точке контура;
- высокая скорость резания;
- высокая универсальность использования для любых материалов, различной толщины;

- высокая точность разделения переходных участков;
- отсутствие повреждения краев у близко расположенных отверстий (толщина перемычки между отверстиями может быть 0,5 мм и даже меньше);
- низкое тангенциальное усилие резания на деталь;
- отсутствует необходимость снятия заусенцев;
- высокая экономичность процесса разделения, т.к. удаляется малый объем материала и используются дешевые расходные материалы;
- отсутствие выделения пыли, появления дыма, токсичных паров;
- отсутствие причин возникновения взрывов и загораний;
- быстрое и простое перепрограммирование.

Однако, несмотря на указанные преимущества, у рассматриваемого метода есть существенные недостатки [2]:

- нарушение качества обработанной поверхности;
- шаржирование поверхности разделения;
- одноразовое использование значительной части абразивного материала.

Отечественные и зарубежные исследователи пытаются расширить технологические возможности метода за счет повышения давления рабочей среды, создания дополнительных перемещений режущей головки и т.д.

Однако предлагаемые методы не позволяют полностью устранить негативные остаточные явления после гидроабразивного разделения. Решением представленной выше проблемы может служить наложение постоянного электрического поля прямой полярности в зону разделения с контролем величины анодного тока.

СХЕМА КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА РАЗДЕЛЕНИЯ

Одна из схем обработки комбинированным способом представлена на рисунке 1. По такой схеме обработка выполняется двумя струями. Первая обеспечивает снятие припуска с разделяемого материала 1 сверхзвуковым потоком абразива 2 в рабочей среде 3. При этом снимаемый материал загрязняет используемый абразив 2, а абразивные зерна могут шаржировать поверхность разделения. Во второй струе за счет передачи электрической энергии от разделяемого материала 1 к токопроводящему наполнителю 4 анодным растворением удаляют припуск "z" с поверхности разделения металла 1 на глубину, достаточную для того, чтобы сила сцепления абразивных зерен с материалом была меньше силы "F" воздействия на него потока рабочей среды 3 с токопроводящим наполнителем 4, что приводит к его удалению (участок а, рисунок 1). Снятие части припуска с поверхности разделения анодным растворением и механическое воздействие токопроводящего наполнителя 4 на поверхности разделения так же уменьшает выступы борозд, оставленные после воздействия на разделяемый металл 1 абразивных зерен 2. Это приводит к снижению шероховатости поверхности разделения (рисунок 2).

Так же токопроводящий наполнитель 4, не участвующий в снятии припуска с поверхности разделения металла 1, сталкивается с загрязненным абразивом 2 (участок б, рисунок 1) и за счет протекания электрохимической реакции удаляет загрязняющий слой с поверхности абразива 2 (рисунок 3). Удаление загрязняющего слоя восстанавливает режущие свойства абразива 2 и дает возможность его повторного использования, что значительно снижает стоимость обработки.

Струя рабочей среды 3 с абразивом 2 и струя рабочей среде 3 с токопроводящим наполнителем 4 подаются в зону разделения через режущую головку, состоящую из смесителя 5 (рисунок 1) и подающей трубки 6, установленных в поворотный корпус 7, который установлен в неподвижном корпусе 8 и зафиксирован стопорным кольцом 9. Струя высокого давления рабочей среды 3 поступает через канал 10 в сопло 11. Здесь жидкость смешивается с абразивом и при протекании через смеситель 5 разгоняет абразив до сверхзвуковой скорости. В подающую трубку 6 поступает поток рабочей среды 3 с токопроводящим наполнителем 4 от смешивающего устройства 12 посредством коллектора 13, подвижно зафиксирован-

ного на поворотном корпусе 7 посредством стопорных колец 9 и неподвижно на корпусе 8. Давление струи рабочей среды 3 с токопроводящим наполнителем 4 должно обеспечивать рекомендованную скорости ее потока "v" (например в [3], стр. 142-144). Поворот корпуса 7 относительно неподвижного корпуса 8 осуществляется электродвигателем 14 и обеспечивает прохождение струи рабочей среды 3 с токопроводящим наполнителем 4 по тому же контуру, что и струя рабочей среды 3 с абразивом 2. К рабочей среде 3 с токопроводящим наполнителем 4 подводят отрицательный полюс источника постоянного тока 15, а к разделяемому металлу 1 – положительный полюс. Повышают напряжение регулятором напряжения 16 до верхней рекомендованной границы (например в [3], стр. 142-144) и контролируют силу анодного тока амперметром 17.

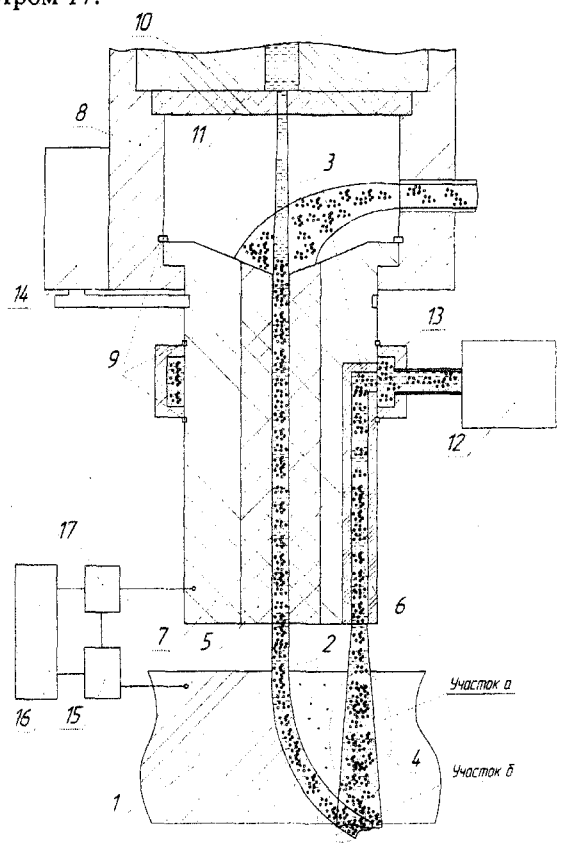


Рисунок 1 – Комбинированное разделение металлов

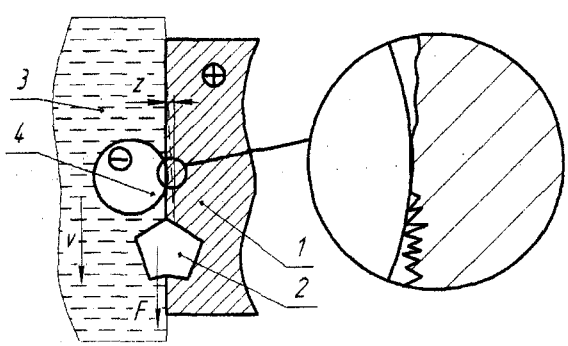


Рисунок 2 – Схема удаления части припуска с поверхности разделения поток токопроводящего наполнителя в рабочей среде

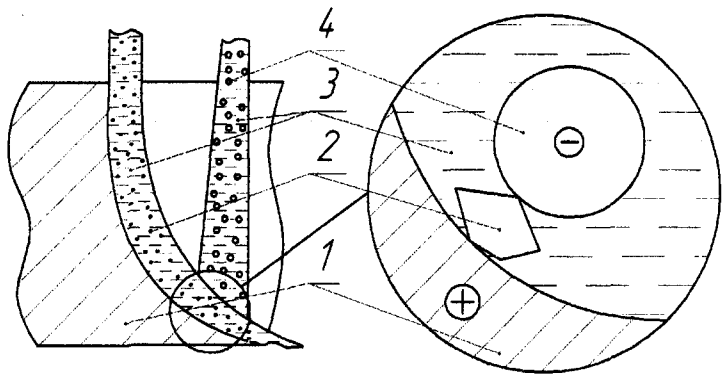
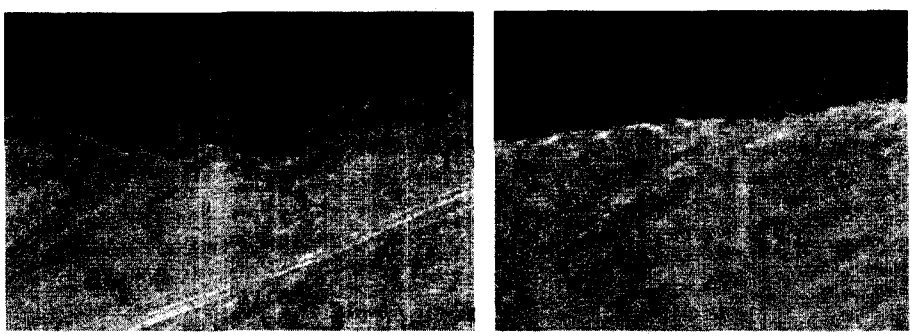


Рисунок 3 – Удаление загрязнения с абразива в процессе комбинированного разделения

После обработки смесь рабочей среды 3, токопроводящего наполнителя 4 и абразива 2 попадает сначала в фильтр для разделения смеси на рабочую среду 3, изношенные части абразива 2 и токопроводящего наполнителя 4, не подходящего для последующего использования, и смесь абразивных зерен 2 и токопроводящего наполнителя 4 пригодному для повторного использования, которые попадают в магнитный сепаратор, где они разделяются.

Экспериментальные данные

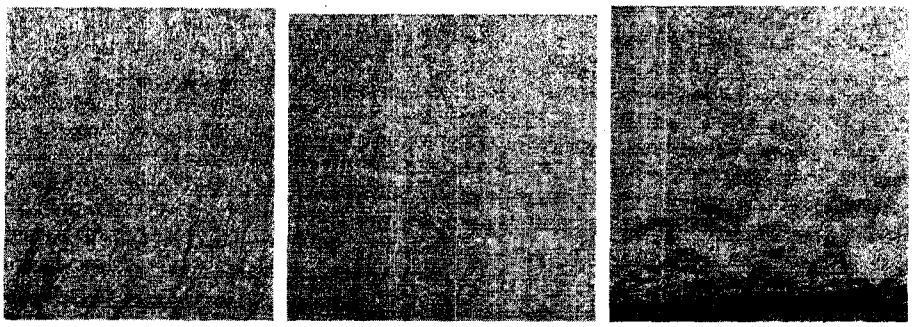
Исследования по комбинированному разделению на серийной установке типа PTV WJ3020E 1Z-D 37 (фирма PTV sro, Чехия) при давлении рабочей среды 415 МПа. В качестве абразива использовался гранатовый концентрат GMA 80. Напряжении на зажимах источника постоянного тока 200 В. Ток подается к токопроводящим гранулам из Ст. 3 диаметром 0,2÷0,3 мм. в промышленной воде. Исследования показали, что при комбинированном разделении алюминиевого сплава Д16 толщиной 12 мм. шероховатость разделенной поверхности снижается до Ra=2,1÷2,5 по сравнению с Ra=3,2÷3,8 при гидроабразивном разделении (рисунок 4). Относительный наклеп поверхностного слоя на входе гидроабразивной струи в разделяемый материал составляет 108÷115 %, а на выходе 112÷119 %, глубина залегания измененного слоя 0,04÷0,08 мм. (при гидроабразивном разделении относительный наклеп поверхностного слоя на входе гидроабразивной струи в разделяемый материал составляет 128÷136 %, а на выходе 135÷143 %. Глубина залегания зоны наклепа составляет 0,1÷0,14 мм.).



а *б*

Рисунок 4 – Шлиф разделенной поверхност
а – после гидроабразивного разделения; б – после комбинированной обработки

Разделение алюминиевого листа толщиной на приведенных ранее режимах очищенным абразивом показало высокую стабильность процесса. При этом шероховатость составила Ra=3,5÷4,2 мкм. (рисунок 5, а). При первичном использовании абразива Ra=3,2÷3,8 мкм. (рисунок 5, б), при разделении загрязненным абразивом Ra=80÷120 мкм (рисунок 5, в).



а б в

Рисунок 5 – Поверхность разделения
а – с очисткой абразива путем анодного растворения загрязнения;
б - при первичном использовании абразива; в – при использовании загрязненного абразива

ВЫВОД

1. Обоснована возможность создания на базе гидроабразивного разделения материалов метода комбинированной обработки с удалением части поверхностного слоя анодным растворением, действующим на разделенную поверхность в период гидроабразивной обработки.

2. Показана возможность очистки загрязненного во время гидроабразивного разделения материалов абразива.

3. Приведено экспериментальное подтверждение эффективности гидроабразивного разделения материалов с наложением на зону обработки концентрированного электрического поля, обеспечивающего повышенное качество поверхностного слоя, в ряде случаев достаточного для получения деталей без дополнительной обработки зоны разделения материалов.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Смоленцев, В.П. Гидроабразивное разделение металлов с наложением электрического поля [Текст] / В.П. Смоленцев, Е.В. Гончаров // Межвуз. сб. науч. тр., Вып.6. Воронеж:ВГТУ. – 2011. - С. 102-108

2.Смоленцев, В.П. Формирование поверхностного слоя при гидроабразивном разделении металлов с наложением электрического поля [Текст] / В.П. Смоленцев, Е.В. Гончаров // Вестник ВГТУ. – 2011. - том 7. - №7. – С.74-77.

3.Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов [Текст] / Под ред. В.П. Смоленцева. - В 2 т. -. М: Высшая школа, 1983.

Гончаров Евгений Владимирович
Воронежский государственный технический университет
аспирант.
Тел. 89056557621
E-Mail: gonevg@yandex.ru

Смоленцев Владислав Павлович
Воронежский государственный технический университет
д-р. техн. наук, профессор.
Тел. 89036559970
E-Mail: smol@comch.ru

Кириллов Олег Николаевич
Воронежский государственный технический университет
д-р. техн. наук, профессор
Тел. 89081472413

E.V. GONCHAROV, V.P. SMOLENTSEV, O.N. KIRILLOV

COMBINED SEPARATION OF METALS IN AN ELECTRIC FIELD

The article deals with the process of separation of the combined metals hydroabrasive method together with the anodic dissolution surface separation, given experimental confirmation of the operability of the method.

Keywords: *division of hydroabrasive materials sharzhirovanie, the quality of the surface layer, the combined treatment, the anodic dissolution.*

BIBLIOGRAPHY

[1]Smolentsev, V.P. Hydroabrasive separation of metals from the superposition of the electric field [Text] / V.P. Smolentsev, E.V. Goncharov // Intercollege. Sat researcher. Tp., Issue 6. - Voronezh: VGTU 2011. - Pp. 102-108.

[2]Smolentsev, V.P. Formation of the surface layer at the separation of metals hydroabrasive with the imposition of an electric field [Text] / V.P. Smolentsev, E.V. Goncharov // Journal of Vilnius Gediminas Technical University. – 2011. - Volume 7. - № 7. - Pp.74-77.

[3] Electrophysical and electrochemical methods for materials processing [Text] / Ed. V.P. Smolentseva. - At 2 m. – Moscow, High School, 1983.

Goncharov Evgeniy Vladimirovich
VGTU
graduate student
Phone 89056557621
E-Mail: gonevg@yandex.ru

Smolentsev Vladislav Pavlovich
VGTU
d.t.n, prof
Phone 89036559970
E-Mail: smol@comch.ru

Kirillov Oleg Nicolaevich
VGTU
d.t.n, prof
Phone 89081472413

УДК 621.002.3

О.Ю. ЕРЕНКОВ, Е.А. БИТЮЦКАЯ, С.Н. ХИМУХИН

НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

В статье представлено описание нового способа формования изделий из эпоксидной смолы, приведены результаты структурных исследований полимерного связующего методами растровой электронной микроскопии и инфракрасной спектроскопии.

Ключевые слова: *стеклопластик, связующее, надмолекулярная структура, наносекундные электромагнитные импульсы, электромагнитное поле*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существуют многочисленные способы получения деталей и изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), однако применение их в качестве конструкционного материала часто ограничивается достигнутым уровнем их прочностных свойств, которые, в свою очередь, лимитируются несовершенством технологического процесса и нестабильностью свойств полимерных связующих. Очень часто имеют место механические повреждения деталей наиболее нагруженных узлов энергетических машин, таких как рабочие лопатки, диски и т.д. Таким образом, задача повышения прочностных свойств ПКМ, в том числе за счет новых технологических решений, является актуальной и имеет научно-практическую важность.

Одним из путей решения данной задачи может быть осуществление модификации полимерного связующего. На современном этапе развития науки о ПКМ существует большое многообразие методов модификации эпоксидного связующего. Однако практическое применение многих из них требуют применения энергоемкого, сложного и дорогостоящего оборудования, специальной подготовки обслуживающего персонала, значительных производственных

площадей, особых мер по охране здоровья человека и окружающей среды, что исключает или ограничивает применение таких способов.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА

На основании анализа литературных и патентных сведений [1,2,3,4,5], предварительной оценке технологичности, экономической и экологической целесообразности можно обоснованно выдвинуть предположение о том, что одним из эффективных способов модификации полимерных связующих явиться электрофизическая обработка, т.е. обработка физическими полями, а именно электромагнитными волнами и импульсами.

Как известно [8,9], полимерные материалы имеют тенденцию к изменению надмолекулярной структуры олигомера за счет электронного возбуждения полимерной структуры после воздействия концентрированными потоками (излучениями) высокой энергии. К излучениям высокой энергии относятся потоки быстро движущихся элементарных частиц (электроны, протоны, нейтроны и др.) и ядер атомов, а также коротковолновое электромагнитное излучение (гамма – и рентгеновские лучи).

На основании вышеизложенного и предположении о том, что электронное возбуждение полимерной структуры может быть вызвано также воздействием наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) и электромагнитного поля (ЭМП) в данной работе представлен новый способ формования изделий из эпоксидной [6]. Разработанный способ относится к технологии переработки полимерных композиционных материалов и может быть использован для изготовления изделий на основе связующего из эпоксидной смолы, например, рабочих колес машин типа центробежного нагнетателя воздуха.

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что в технологическом процессе изготовления изделий включена операция предварительной (до операций формования и отверждения) электрофизической обработки эпоксидного связующего. Электрофизическая обработка связующего состоит из одновременного воздействия на связующее в жидкой фазе наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и электромагнитным полем (ЭМП). Технической задачей, на решение которой направлено изобретение, является повышение физико-механических свойств изделий.

Для реализации данного способа разработана и изготовлена экспериментальная установка, схема которой а также параметры электрофизической обработки связующего, представлены в работе [7]. В той же работе [7] представлены результаты исследования механических свойств стеклопластика, установлено, что максимальное повышение прочности имеет место при совместной обработки связующего НЭМИ и ЭМП в течение 25 минут.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

В работе проводились сравнительные исследования (рисунок 1), которые позволили проследить изменение морфологии полимерного связующего при обработке НЭМИ и ЭМП. Данные исследования проводилось с помощью растрового электронного микроскопа марки JSM-6480 (фирма JEOL, Япония).

На рисунке 1, а, представлены микрофотографии необработанного образца. Видно, что структура образца сферолитная, сферолиты размером от 2-6 мкм по длине и от 2-5 мкм по ширине, сколы рельефные, что свидетельствует о хрупком разрушении образцов. После электрофизической обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 минут надмолекулярная структура композитов, (рисунок 1, б), значительно меняется. В первую очередь это отражается на механизме разрушения образцов, которое происходит по пластическому механизму, т.к. сколы отличаются сглаженными границами разрушения. Во-вторых, наблюдается еще более выраженная анизотропия роста надмолекулярных образований, которые представляют собой больше фибриллярную структуру, чем сферолитную, несмотря на наличие центров кристаллизации по сферолитному типу.

Таким образом, электрофизическая обработка НЭМИ и ЭМП привела к тому, что в образцах происходит переориентация сферолитных образований в фибриллярные. При этом

следует отметить, что изменения химической структуры исследуемого материала находятся в пределах погрешности эксперимента, о чем свидетельствуют результаты ИК-спектроскопии образцов, (рисунок 2).

Эффект влияния предварительного воздействия НЕМИ и ЭМП, как индивидуальных, так и совместного предлагается объяснить следующим образом.

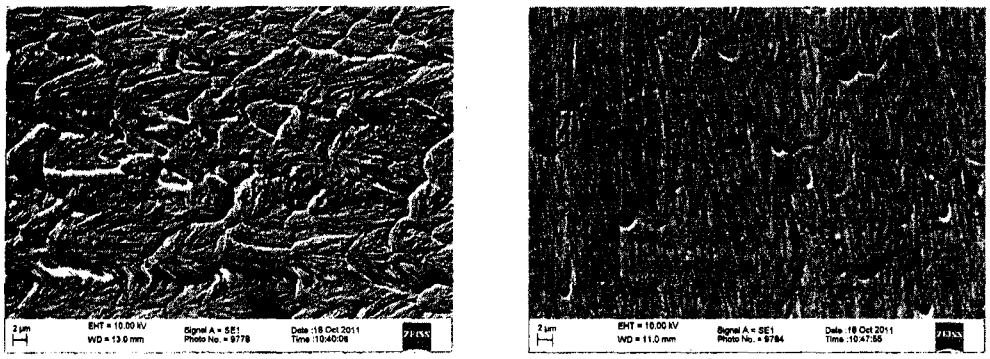
Согласно с дырочной концепцией жидкого состояния Я.И. Френкеля [8] частицы жидкости находятся в гармоническом колебании около некоторого положения равновесия, а через некоторый промежуток времени τ атом может перескочить в новое положение равновесия, расположенное на близком к межатомному расстоянию.

Воздействие НЭМИ на полимерное связующее в жидкой фазе, очевидно, способно увеличить количество атомов, обладающих избыточной энергией, необходимой для совершения акта перехода частицы из одного положения равновесия в другое. Такой переход, как известно [8,9,10], вызывает разрыв химических связей. При этом разрыв связей обычно сопровождается образованием на их концах радикалов, обладающих высокой реакционной способностью, что является причиной последующего восстановления разорванных химических связей. Учитывая малую длительность одного импульса, составляющую 1нс, можно предположить, что вероятности процессов разрыва связей и их восстановления будет примерно одинакова, т.е. в некоторых случаях равновесие между актами разрыва связей и актами их восстановления несколько смещается в сторону преобладания актов разрыва, а в других случаях – в сторону преобладания актов восстановления. Таким образом, индивидуальное воздействие НЭМИ, при установленных параметрах, на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

Индивидуальное воздействие ЭМП на исследуемый эпоксидный олигомер Этал Т 210 в жидком состоянии приводит к образованию в его объеме пондеромоторных сил, т.е. сил давления электромагнитных волн на помещенную в электромагнитное поле вещество. Механизмы возникновения и действия данных сил подробно исследованы и представлены в известном труде Ландау Л.Д. [11]. Под действием пондеромоторных сил происходит упругое деформирование основных полимерных цепей связующего, что связано с изменением в макромолекулах межатомных расстояний и валентных углов, а также – с изменением межмолекулярных расстояний, за счет преодоления межмолекулярных Ван-дер-ваальсовых сил упругости.

Таким образом, должно иметь место изменения формы макромолекул связующего, т.е. изменение их конформаций. В работах Аскадского А.А. и Тагера А.А. [9,10] отмечено, что конформационные превращения макромолекул не сопровождаются разрывом химических связей. Следовательно, можно заключить, что индивидуальное воздействие ЭМП, при установленных параметрах, на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

При комбинированном воздействии НЭМИ и ЭМП одновременно имеют место, по всей вероятности, эффекты описанные выше. Изменение конформации макромолекул с большой вероятностью позволит обеспечить интенсивное взаимодействие образующихся во время обработки НЭМИ активных радикалов и концевых групп друг с другом, образуя поперечные химические связи между макромолекулами. Это должно привести к образованию, возможно частично, пространственной структуры полимерного связующего на данной стадии производства стеклопластика. Возможность протекания реакции сшивания в полимерах до проведения технологической операции отверждения установлена, например, исследованиями Тагера А.А. [10]. При последующем отверждении связующего происходит, возможно, окончательное формирование пространственной структуры полимерного связующего. Образование пространственной структуры способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика, что и подтверждается результатами экспериментальных исследований [7].



а б

Рисунок 1 – Морфология полимерного связующего: а – до электрофизической обработки; б – после совместной обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 минут

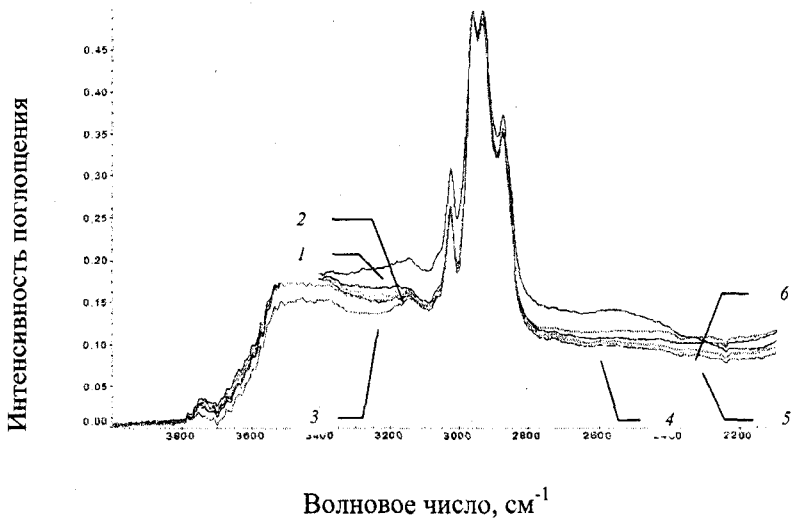


Рисунок 2 –Результаты инфракрасной спектроскопии: 1 – до электрофизической обработки; 2 – НЭМИ и ЭМП 5 минут; 3 – НЭМИ и ЭМП 10 минут; 4 – НЭМИ и ЭМП 15 минут; 5 – НЭМИ и ЭМП 20 минут; 6 – НЭМИ и ЭМП 25 минут

ВЫВОДЫ

1. Установлена, методом растровой электронной микроскопии, трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего от сферолитной к фибриллярной после его совместной обработки наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным полем; при этом изменений химической структуры исследуемого материала не происходит, о чем свидетельствуют результаты ИК-спектроскопии образцов.

2. Разработан новый способ формования изделий из эпоксидной смолы с целью повышения прочностных свойств стеклопластика, основанный на применении предварительной обработки наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным переменным полем полимерного связующего в жидкой фазе; техническая сущность способа защищена патентом на изобретение (№2422273).

Данная работа выполнена в рамках Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет» (г. Хабаровск)

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Кулезнев, В.Н. Химия и физика полимеров [Текст] / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 367 с.

2.Зеленев, Ю.В. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации [Текст] / Ю.В. Зеленев, В.И. Хромов // Пластические массы. - 2002. - № 11.

3.Кестельман, В.Н. Термомагнитная обработка полимерных композиционных материалов [Текст] / В.Н. Кестельман, А.Д. Стадник.- М.: НИИ - ТЭХИМ. - 1989.

4.Бартенев, Г.М. Курс физики полимеров [Текст] / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. - Л.: Химия, 1976.

5.Арьев, А.М. Термоэлектрическая модификация полимерных материалов [Текст] / А.М. Арьев, Ю.В. Зеленев.// Наука и технология в России. – 1995. - №9. - С. 13.

6.Патент №2422273 Российская федерация, (51) МПК B29C 41/04. Способ формования изделий из эпоксидной смолы [Текст] / Еренков О.Ю., Игумнов В.П., Игумнов П.В., Никишечкин В. Л., Богачев А.П. – Заявка № 2009145870/05; заявлено 10.12.2009; опубликовано 27.06.2011, Бюл. №18.

7.Еренков, О.Ю. Исследование механических свойств полимерных композитных материалов [Текст] /О.Ю. Еренков, П.В. Игумнов, В.Л. Никишечкин // Вестник машиностроения.- 2010.- №4. - С. 61-63.

8.Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я.И. Френкель. - Л.: Наука, 1975.

9.Аскадский, А. А. Деформация полимеров [Текст] / А.А. Аскадский. - М.: Химия, 1973. - 448 с.

10.Тагер, А.А. Физикохимия полимеров [Текст] / А.А. Тагер.- М.: «Химия».- 1978.- 544 с.

11.Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.- М.: Физматгиз, 1959. - 532 с.

Еренков Олег Юрьевич
ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск,
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Химическая технология и биотехнология»
Телефон: (4212) 37-52-31,
E-mail: erenkov@list.ru

Химухин Сергей Николаевич
Институт материаловедения ДВО РАН, г. Хабаровск
Доктор технических наук,
заведующий лабораторией «Конструкционные и инструментальные материалы»
Телефон: (4212) 22-65-98,
E-mail: ximyxin@mail.ru

Битюцкая Евгения Артуровна
ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский
Государственный университет», г. Хабаровск,
Студентка кафедры «Химическая технология и биотехнология»
Телефон: (4212) 37-52-31,
E-mail: erenkov@list.ru

O. Ju. ERENKOV, E.A. BITUTSKAYA, S.N. KHIMUKHIN

NEW METHOD OF FIBERGLASS PLASTIC DETAILS FORMING FROM PLASTIC BINDER

In this article the new method of polymer binder modification and design of experimental apparatus are described. Results of experimental researches of over molecular plastic binder structure by means of REM and IRS methods are presented.

***Key words**: fiberglass plastic, plastic binder, over molecular structure, nanosecond electromagnetic pulses, electromagnetic field.*

BIBLIOGRAPHY

[1]. Kuleznev, V.N. Polymer chemistry and physics [Text] / V.N. Kuleznev, V.A. Shershnev. - 2-Ed. pererab. and extras. - M.: Colossus, 2007. – 367 p.

[2]. Zelenev, U.V. Forecast changes in the physical properties of polymeric materials in different ways their modifications [Text] / U.V. Zelenev, V.N Khromov. // Plastic mass. – 2002. - No. 11.

[3]. Kestelman, V.N. Termomagniting processing of polymer composite materials [Text] /V.N. Kestelman, A.D. Stadnik. - M.: Sri-TEHIM. - 1989.

[4]. Bartenev, G.M. Physics polymers [Text] / G.M. Bartenev, Y.V. Zelenev. - L.: Chemistry, 1976.

[5]. Aryev, A.F. Modification of polymeric thermo-electric materials [Text] / A.F. Aryev, Y.V. Zelenev // Science and technology in Russia. -1995. - No. 9. - P. 13.

[6]. Patent 2422273 Russian Federation (51) IPC V29S 41/04. Method of thermoforming of epoxy resin/Erenkov O.Y., Igumnov V.P., Igumnov, V.L. Nikishechkin, Bogachev A.P. - Application No. 2009145870/05; 10.12.2009 stated; posted on 27.06.2011, Newsletter. - No. 18.

[7]. Erenkov, O.Y. Study mechanical properties of polymeric composite materials [Text] / O.Y. Erenkov, P.V., Igumnov, V.L. Nikishechkin // Bulletin of engineering – 2010. - No. 4. - Pp. 61-63.

[8]. Frenkel, Y. I. Kkinetic theory of liquids [Text] / Y. I. Frenkel. - L.: Nauka, 1975.

[9]. Askadskij, A. A. Deformation of polymers [Text] / A.A. Askadskij. -Moscow: Chemistry, 1973. – 448 p.

[10]. Tager, A.A. Physical chemistry of polymers [Text] / A.F. Tager. - M.: "Chemistry." - 1978. – 544 p.

[11]. Landau, L. D. Electrodynamics continuum [Text] / L.D Landau, E.M. Lifshitz. - M.: Fizmatgiz, 1959. - 532 p.

Erenkov Oleg Yurievich
Doc. Sc. Tech., Prof
FSBEI HVT "Pfcific National University"
Phone (4212) 37-52-31
E-mail: erenkov@list.ru

Khimukhin Sergey Nikolaevich
Doc. Sc. Tech., Prof
Institute of of Institute of Materials of Far-East branches of the Russian Academy of Sciences
Phone (4212) 22-65-98
E-mail: ximyxin@mail.ru

Bitutskaya Evgeniya Arturovna
FSBEI HVT "Pfcific National University"
Phone (4212) 37-52-31
E-mail: erenkov@list.ru

УДК 621.9

О.Л. ЗОЛОТУХИНА, Ю.Н. ФЕДОРОВ

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС ПРИ ЗУБОНАРЕЗАНИИ ПО МЕТОДУ ОБКАТА

Рассмотрен процесс возникновения погрешности формы зубьев цилиндрических колес в продольном и поперечном направлениях при зубонарезании по методу обката. Представлены зависимости для определения величины погрешности.

***Ключевые слова**: зубчатое колесо, погрешность формы нарезаемых зубьев, метод обката.*

Характерной особенностью процесса зубонарезания твердосплавными резцовыми головками способом обката является отсутствие продольной подачи инструмента или заготовки, вследствие чего нарезаемые зубья имеют криволинейную образующую.

Известная зависимость

$$f_{\acute{a}} = f \cdot \sin\alpha = \frac{b^2}{4D_u}\sin\alpha \qquad (1)$$

между погрешностью формы зуба в продольном направлении $f_{\acute{a}}$, шириной зубчатого венца b, диаметром инструмента D_u и углом профиля α была выведена в предположении, что в торцовых сечениях $I_B - I_B$ (рисунок 1) профиль производящей рейки не изменяется. В действительности же это не так и, следовательно, только в сечении $I - I$ будет образовываться теоретически правильный эвольвентный профиль. Предполагалось также, что передний угол инструмента $\gamma = 0^{\hat{i}}$. В то же время известно, что для повышения стойкости твердосплавного инструмента, который работает в условиях ударных нагрузок, целесообразно переднюю грань выполнять с отрицательными передними углами (так называемая негативная геометрия). Отклонение переднего угла от 0 также вносит изменения в форму нарезаемых зубьев.

В связи с изложенным следует более точно выяснить общую картину возникновения погрешностей формы зубьев как в продольном, так и в поперечном направлениях.

На рисунке 2 показана схема, с помощью которой определяется погрешность формы нарезаемых зубьев, если в плоскости передней грани, имеющей передний угол γ, боковые

режущие кромки зуба инструмента выполнены прямолинейными. При этих условиях в сечении *I – I* инструмента будем иметь однополостный гиперболоид вращения и, следовательно, боковые стороны зуба производящей рейки будут очерчены отрезками гиперболы.

Уравнение поверхности однополостного гиперболоида вращения имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=1.$$

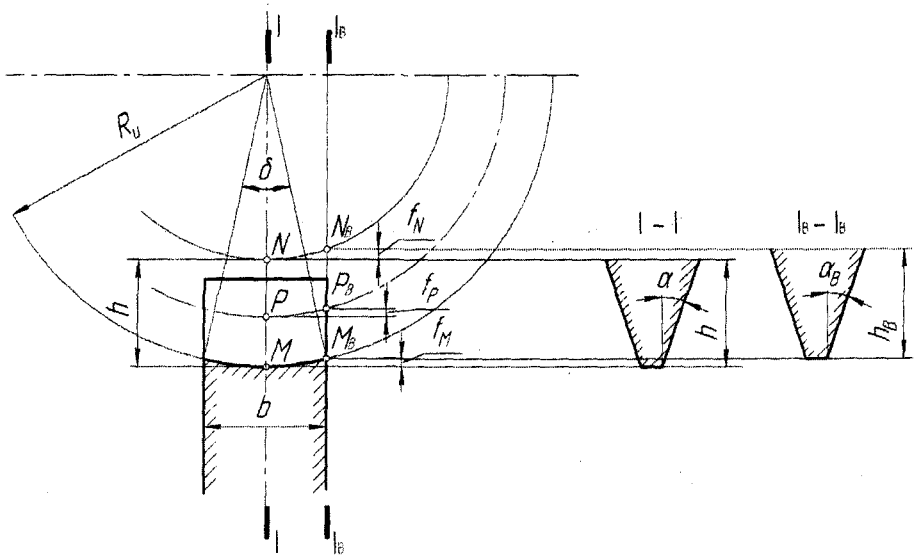


Рисунок 1 – Схема для расчета погрешностей профиля зубьев в продольном направлении

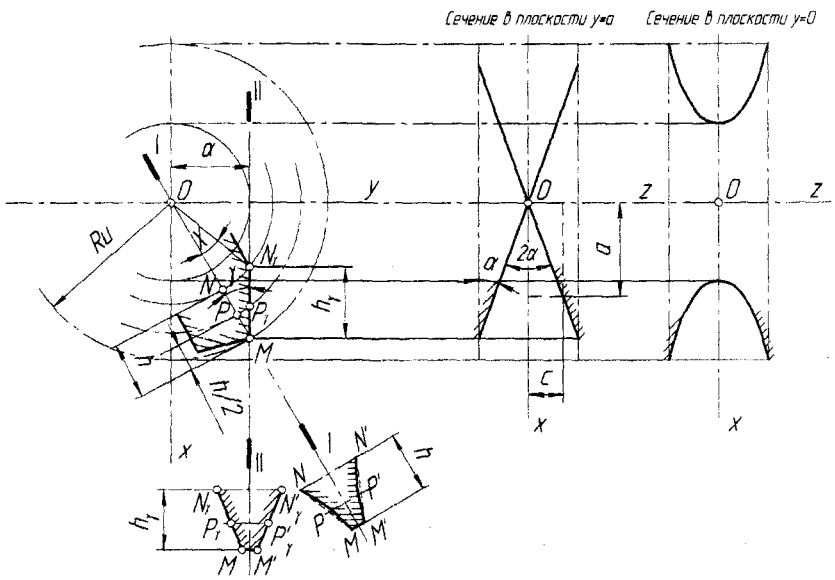


Рисунок 2 – Схема для расчета профиля зубьев инструмента

В сечении плоскостью $y=a$ (соответствует сечению *II – II*) имеем

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{a^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=1$$

или в преобразованном виде

$$\left(\frac{x}{a}-\frac{z}{c}\right)\left(\frac{x}{a}+\frac{z}{c}\right)=0. \qquad (2)$$

Проецируя полученные прямые на плоскость *XOZ*, получим

$$\frac{x}{a}-\frac{z}{c}=0 \quad \text{и} \quad \frac{x}{a}+\frac{z}{c}=0,$$

где

$$\frac{c}{a}=k_1 \quad \text{и} \quad -\frac{c}{a}=k_2.$$

Из рисунка 2 следует, что

$$k_1=\frac{c}{a}=tg\alpha_\gamma \quad \text{и} \quad c=a\cdot tg\alpha_\gamma. \qquad (3)$$

В сечении плоскостью *XOZ* получим гиперболу, уравнение которой имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2}-\frac{z^2}{a^2tg^2\alpha_\gamma}=1 \qquad (4)$$

или

$$z^2=\left(x^2-a^2\right)\cdot tg^2\alpha_\gamma, \qquad (5)$$

где α_γ – угол профиля резца в плоскости передней грани;

a – действительная полуось (радиус горловины),

$$a=R_u\cdot\sin\gamma$$

Определим α_γ при значении угла профиля α в осевом сечении инструмента.

Из рисунка 2 следует

$$tg\alpha=\frac{NN'-MM'}{2h} \text{ и } tg\alpha_\gamma=\frac{N_\gamma N'_\gamma-MM'}{2h_\gamma},$$

откуда

$$tg\alpha_\gamma=\frac{h}{h_\gamma}tg\alpha \qquad (6)$$

Из треугольника OMN_γ

$$h_\gamma=\frac{(R_u-h)\sin x_n}{\sin\gamma}.$$

После преобразования при $h=0{,}25m$ получим

$$tg\alpha_\gamma=\frac{5m\cdot\sin\gamma}{(D_u-5m)\sin x_n}tg\alpha, \qquad (7)$$

где α – угол профиля зуба производящей рейки;

$$x_n=\sin^{-1}\frac{D_u\cdot\sin\gamma}{D_u-5m}-\gamma \qquad (8)$$

Уравнение для определения радиуса кривизны гиперболы имеет вид

$$R=a^2\cdot c^2\left(\frac{x^2}{a^4}+\frac{z^2}{c^4}\right)^{3/2}.$$

С учетом (3) после преобразования получаем

$$R = \frac{tg^2\alpha_\gamma}{a^2}\left(x^2 + \frac{z^2}{tg^4\alpha_\gamma}\right)^{3/2}. \qquad (9)$$

Вычисления при D_u=215 мм; m=2,5 мм; $\gamma = 8^\circ$ показали, что отклонение криволинейного профиля от прямых MN и $M'N'$ (рисунок 2) настолько мало (в точке P профиля ≈ 0,3 мкм), что практически не оказывает влияния на профиль нарезаемых зубьев. Следовательно, можно считать, что в осевом сечении инструмента имеем прямолинейный профиль и в качестве производящей поверхности — поверхность конуса вращения.

Для определения уравнения образующей нарезаемых ДРГ зубьев рассмотрим рисунок 3, а, на котором изображено осевое сечение поверхности конуса вращения.

Сечение этой поверхности плоскостью NN, проходящей через точку A под углом β<90°-α к оси конуса дает кривую 2-го порядка – гиперболу. Если за начало координат принять вершину A кривой и ось ординат совместить с касательной в вершине (рисунок 3, б), то коническое сечение можно представить уравнением

$$y^2 = 2px - (1-\varepsilon^2)x^2, \qquad (10)$$

где p – параметр, а ε — эксцентриситет кривой.

Для нахождения p и ε конического сечения плоскостью NN необходимо определить угловой коэффициент асимптот и длину действительной оси гиперболы.

Угловой коэффициент $tg\varphi'$ найдем из треугольника MOM' (рисунок 3, а).

$$tg\varphi' = \frac{MM'}{M'O}.$$

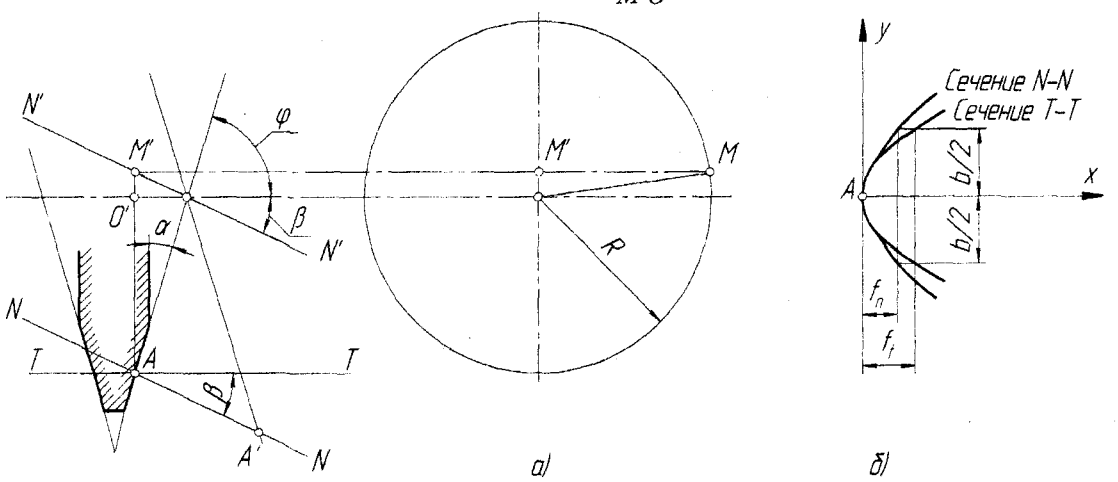


Рисунок 3– Схема для определения образующей зубьев, нарезаемых резцовыми головками

Из построения замечаем

$$MM' = \sqrt{R^2 - |M'O'|^2}.$$

После подстановки и преобразования получим

$$MM' = R\frac{\sqrt{\cos(\alpha+\beta)\cos(\alpha-\beta)}}{\cos\alpha\cdot\cos\beta}.$$

Из треугольника $M'O'O$ определим отрезок $M'O$

$$M'O = \frac{R\cdot tg\alpha}{\cos\beta}.$$

Тогда

$$tg\varphi' = \frac{\sqrt{\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}}{\sin\alpha} \quad (11)$$

Действительная ось $2a = AA'$ может быть найдена из треугольника AOA'

$$\frac{AA'}{\sin 2\alpha} = \frac{AO}{\sin[90^\circ-(\alpha+\beta)]},$$

откуда, подставляя значение AO и преобразовывая, получим

$$2a = \frac{2R\cdot\sin\alpha}{\cos(\alpha+\beta)}. \quad (12)$$

Эксцентриситет гиперболы

$$\varepsilon = \frac{c}{a},$$

где c – полуфокусное расстояние;
a – действительная полуось.
Полуфокусное расстояние

$$c = \sqrt{a^2+b^2},$$

где b – мнимая полуось.
Причем

$$b = a\cdot tg\varphi'.$$

После подстановки из формул (11), (12) и преобразования получим

$$b = R\sqrt{\frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos(\alpha+\beta)}}. \quad (13)$$

Тогда

$$c = R\frac{\sqrt{\sin^2\alpha+\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}}{\cos(\alpha+\beta)} \quad (14)$$

и эксцентриситет

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sin^2\alpha+\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}}{\sin\alpha} \quad (15)$$

Параметр кривой

$$p = \left(c-\frac{a}{\varepsilon}\right)\varepsilon$$

или

$$p = \frac{c^2-a^2}{a}$$

Подставляя значение составляющих, и преобразовывая, получим

$$p = \frac{R\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin\alpha} \quad (16)$$

Подстановка значений p и ε в уравнение (10) дает

$$y^2 = \frac{2R\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin\alpha}x - \left[1-\frac{\sin^2\alpha+\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin^2\alpha}\right]x^2,$$

или окончательно уравнение образующей зубьев колес, нарезаемых твердосплавными резцовыми головками по методу обката, примет вид

$$y^2 = \frac{2R\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin\alpha}x + \frac{\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin^2\alpha}x^2 \quad (17)$$

Здесь R — радиус инструмента в данной точке профиля;
α — угол осевого профиля производящей поверхности;

β — угол наклона секущей плоскости, проходящей через данную точку осевого профиля производящей поверхности.

Рассматривая уравнение (17) в определенных пределах $y = \pm\frac{b}{2}$ получим квадратное уравнение

$$\frac{\cos(\alpha+\beta)\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin^2\alpha}x^2 + \frac{2R\cdot\cos(\alpha-\beta)}{\sin\alpha}x - \frac{b^2}{4} = 0, \qquad (18)$$

где b– ширина зубчатого венца нарезаемого колеса.

Решая уравнение (18), найдем:
при β = 0

$$x = \left(\sqrt{R^2 + \frac{b^2}{4}} - R\right)\cdot tg\alpha \qquad (19)$$

при β = α

$$x = \frac{\left(\sqrt{R^2 + \frac{B^2\cdot\cos 2\alpha}{4}} - R\right)\sin\alpha}{\cos 2\alpha} \qquad (20)$$

Таким образом, образующей зубьев, нарезаемых резцовыми головками, является кривая 2-го порядка — гипербола.

Величину стрелки, определяющей вогнутость образующей в направлении, нормальном к профилю зуба f_n, можно найти, используя выражение (20), а в направлении касательной к начальной окружности f_t – выражение (19).

Результаты вычислений по формуле (20) и по приближенной формуле (1) показывают, что расхождение очень незначительно (около 1 мкм), следовательно, для определения величины стрелки вогнутости образующей зуба можно использовать приближенную формулу (1).

Работы выполнены при финансовой поддержке МИНОБРНАУКИ РФ (темплан НИР ТулГУ, тема № госрегистрации 7.1439.2011)

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

Золотухина Ольга Леонидовна
Тульский государственный университет, г. Тула
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения»
300012, г. Тула, пр-т Ленина, д.92, тел. (4872) 33-23-10
E-mail: apostrof@pochta.ru

Федоров Юрий Николаевич
Тульский государственный университет, г. Тула
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»
300012, г. Тула, пр-т Ленина, д.92, тел. (4872) 33-23-10

O.L. ZOLOTUKHINA, Yu.N. FYODOROV

SPUR GEAR TEETH SHAPE ERRORS ANALYSIS FOR GENERATING TOOTH-CUTTING PROCESS

Keywords: *gear, tooth shape error, generating process.*

Zolotukhina Olga Leonidovna
Tula State University, Tula
Ph.D. (engineering), Associate Professor, Dept. of Manufacturing Technology
Russia 300012 Tula Lenin pr., 92, tel. +7(4872) 33-23-10
E-mail: apostrof@pochta.ru

Fyodorov Yuri Nikolaevich
Tula State University, Tula
Full Doctor (engineering), Full Professor, Dept. of Manufacturing Technology
Russia 300012 Tula Lenin pr., 92, tel. +7(4872) 33-23-10

УДК 621.7.02

М.Ю. КУЛИКОВ, Р.Е. РЫГИН

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВАХ

В статье выявляются причины достаточно низкой точности отверстий, полученных в хромоникелевых сплавах хонингованием.

Ключевые слова: *Хонингование, хонингование хромоникелевых сплавов, износ абразивных зёрен.*

В современном машиностроении существует сложная технологическая задача получения высокоточных отверстий в труднообрабатываемых материалах.

Для получения таких отверстий и обеспечения их требуемого качества широко используют хонингование.

Разработанная в последние годы теория формообразования при хонинговании поверхностей вращения позволила выявить зависимости, связывающие технологические параметры инструмента с погрешностью обработки и точностью обрабатываемых отверстий (1).

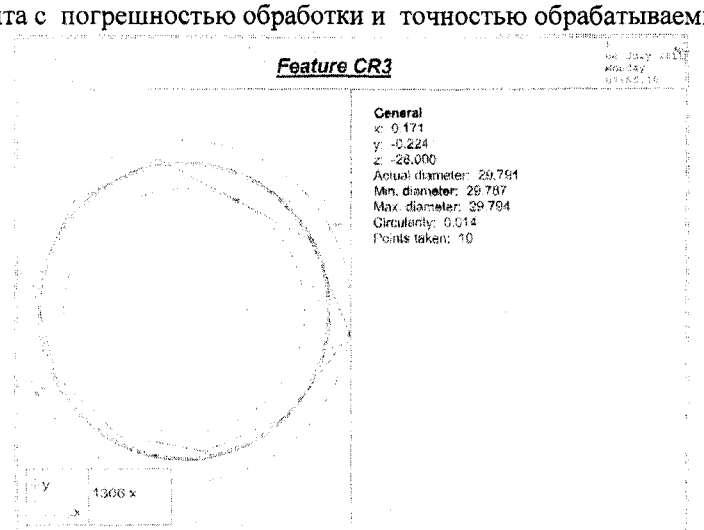


Рисунок 1 - Круглограмма отверстия в хромоникелевом сплаве после хонингования

Ранее проведённые исследования (2), показали эффективность хонингования на операциях финишной обработки высокоточных отверстий. Однако при обработке отверстий в хромоникелевых сплавах, используемых в авиадвигателях, достижение высокой точности затрудно.

Целью данной работы является – выявление причин достаточно низкой точности отверстий, полученных в хромоникелевых сплавах хонингованием и изыскание способов достижения требуемой точности.

Исследование проводилось на хонинговальном станке SUNNEN CK-21 при обработке цилиндрических и конических отверстий Ø30 $_{(-0,006)}$ в хромоникелевых сплавах марки ХН-78Т с использованием СОТС Shell Macron 2442 М-3.

Контроль точности получаемых отверстий производился на КИМ с ЧПУ TESA S-10T.

Так же проведено микрофографирование (увеличение х100) полученных поверхностей обработанных отверстий, на микроскопе Hawk 200.

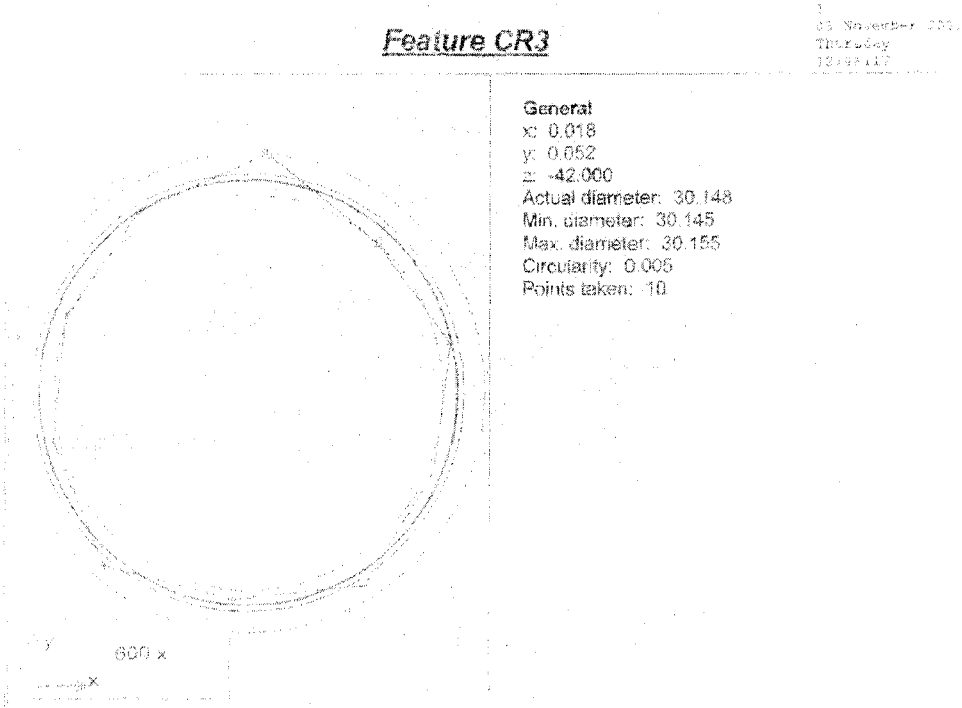


Рисунок 2 - Круглограмма отверстия в стали 45 после хонингования

Анализ полученных данных показал, что при хонинговании отверстий в хромоникелевых сплавах идёт искажение формы по образующей отверстия. Это отклонение от точности формы отверстий наблюдается после 50мм длины отверстия. Однако при обмерах полученных отверстий в хромоникелевых сплавах, глубиной свыше 50мм обнаружилось, что отверстия обладают конусностью. Причём, конусность отверстия в поперечном сечении направлена от захода инструмента вглубь по образующей отверстия.

Таких отклонений и конусности при обработке отверстий в стали 45, обладающей хорошей обрабатываемостью не фиксируется.

Обнаруженные вырывы и налипы (рисунок 4) на поверхности обработанных отверстий в хромоникелевых сплавах свидетельствуют о низкой стойкости алмазного инструмента.

После обработки одного отверстия в стали 45 явно выраженного износа абразивных зёрен не наблюдается.

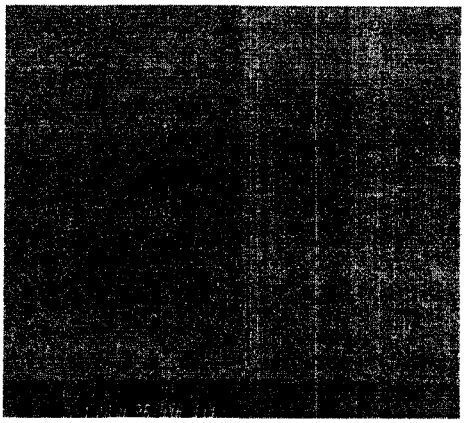


Рисунок 3 - Микрофотография (x100) поверхности отверстия после обработки в стали 45

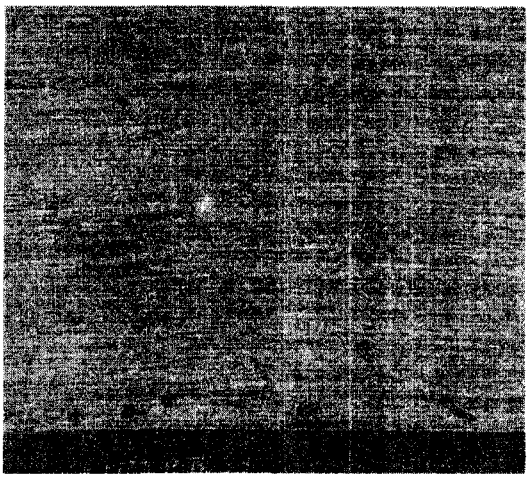


Рисунок 4 - Микрофотография (x100) поверхности отверстия после обработки в хромоникелеевом сплаве

Это позволяет сделать вывод о том, что при обработке хромоникелевых сплавов наблюдается ускоренный износ абразивных зёрен хона в начальный момент резания, а так же, что силы резания при алмазном хонинговании хромоникелевых сплавов значительно изменяются в течении периода обработки одного отверстия, которые ведут к искажению формы получаемого отверстия. По обнаруженному скоротечному износу самой связки, происходит удаление из алмазоносного слоя алмазных зерен. Т.е. низкий ресурс работы хона является причиной низкой точности получаемых отверстий в хромоникелевых сплавах.

Поэтому для достижения требуемой точности отверстий в труднообрабатываемых материалах необходимо увеличить износостойкость применяемых хонов.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Прогрессивные методы хонингования [Текст] / С.И. Куликов и др.-М: Машиностроение, 1983.-135 с.

2.Фрагин, И.Е. Новое в хонинговании [Текст] / И.Е. Фрагин. - М: Машиностроение, 1980. - 95 с.

3.Фрагин, И.Е. Исследование процесса хонингования [Текст] / И.Е. Фрагин, В.Г, Сафронов. - М: НИИмаш, 1965. - 87 с.

Куликов Михаил Юрьевич
Московский Государственный Университет Путей Сообщения (МИИТ) г. Москва
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Моб. Тел. +7(964)578-56-89
E-mail: muk.56@mail.ru

Рыгин Роман Евгеньевич
Московский Государственный Университет Путей Сообщения (МИИТ) г. Москва
Аспирант
Моб. тел.+7(926)589-96-25
E-mail: ryroe@rambler.ru

M.U. KULIKOV, R.E. RYGIN

STUDYING OF REGULARITIES OF A SHAPING AT A HONING OF HIGH-PRECISION OPENINGS IN HARD-PROCESSING ALLOYS

In article the reasons of rather low accuracy of the openings received in hromonikel alloys by a honing are established.

***Key words**: Honing, honing of hromonikel alloys, wear of abrasives grains.*

BIBLIOGRAPHY

[1]Progressive methods of honing [Text] / Page. I.Kulikov, etc. - Moscow: Mechanical engineering, 1983. - 135 p.

[2]Fragin I.E. New in a honingovaniye [Text] / I.E. Fragin. - M: Mechanical engineering, 1980. - 95 p.

[3]Fragin I.E., Safronov V. G. Process research honing [Text] / I.E. Fragin, V.G. Safronov. -Moscow: Niimash, 1965. - 87 p.

Kulikov Michel Ur'evich
Moscow State University of Railway Engineering
Doctor of Technical Science, professor of the cathedra "Technology of mecahnicak engineering"
Phone. +7(964)578-56-89
E-mail: muk.56@mail.ru

Rygin Roman Evgenyevich
Moscow State University of Railway Engineering
P.G
Phone.+7(926)589-96-25
E-mail: ryroe@rambler.ru

УДК 621.9.047

А.В. МАСЛОВ, А.А. МАСЛОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ВОДНО-АЦЕТАМИДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Приводятся результаты исследований обрабатываемости титана в водно-ацетамидных растворах солей с целью оценки производительности, точности обработки и качества поверхности.

***Ключевые слова:** электрохимическая обработка (ЭХО)*

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическая обработка (ЭХО) изделий из титановых сплавов в традиционных водных растворах минеральных солей сопровождается определенными ограничениями. В частности, при плотностях тока до 5÷15 А/см^2 (в зависимости от марки титанового сплава и состава рабочей среды) обработка сопровождается питтинговым поражением поверхности, а в ряде случаев наводороживанием поверхностного слоя. Это вызывает необходимость предусмотрения дополнительного припуска и введения в технологический процесс последую

щих технологических операций, в том числе и трудоемких доводочных (в ряде случаев ручных).

Перспективным направлением совершенствования метода ЭХО, повышения его конкурентоспособности является использование нетрадиционных (органических и водно-органических) рабочих сред. Их применение расширяет возможности и области применения ЭХО по сравнению с ЭХО в водных растворах электролитов. В результате удается получать поверхности с высокими качественными характеристиками (низкая шероховатость, сглаженный микропрофиль, высокая отражательная способность, отсутствие наводороживания и микрорастравливания поверхностного слоя,).

Определенный интерес представляет использование органических растворителей амидной группы. Одним из представителей этой группы является ацетамид.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Гравиметрические исследования проводились на вращающемся дисковом электроде в ячейке с неразделенными электродными пространствами. Рабочая (торцовая) поверхность электрода составляла 0,07 $см^2$. Образцы изготавливались из технически чистого титана марки ВТ1-0. Частота вращения электрода составляла 1000 об/мин, температура раствора поддерживалась в интервале 20÷25 °С. В качестве источника питания использовались программатор ПР-8 и потенциостат ПИ-50-1.1. Для оценки массы растворенного металла применялись весы лабораторные марки ВЛР-200.

Электролит готовился путем смешивания ацетамида (CH_3CONH_2) и воды с последующим добавлением соли. Ацетамид в обычном состоянии представляет собой кристаллическое вещество (физико-химические свойства представлены в таблице 1). Жидкое состояние ацетамида можно получить либо растворив в воде, либо нагрев его до температуры 81°С. Минимально возможная концентрация воды для растворения ацетамида соответствует весовому соотношению воды к ацетамиду 1/1) (мольное отношение 3,28/1). Как видно (таблица 1) плотность ацетамида близка к плотности воды. Диэлектрическая постоянная (ε), являющаяся важным показателем при выборе органического растворителя [1], достаточно велика (для воды ε = 80,4 Ф/м). Температура кипения ацетамида более чем в 2 раза превышает температуру кипения воды, что очень важно при выборе циклограммы обработки и технологических параметров процесса ЭХО.

Таблица 1 – Физико-химические свойства ацетамида

M, г/моль	$T_{пл}$, °С	$T_{кип}$, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, $кг/м^3$	η, МПа·с	μ, Д	ε, Ф/м	χ, $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$
59,07	81,1	221,2	0,987	1,63	3,44	60,6	$<4,3 \cdot 10^{-3}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали экспериментальные исследования, при использовании водно-ацетамидных хлорнокислых растворов с ростом плотности тока выход по току увеличивается и проходит через максимум (рисунок 1).

Максимально достигаемые значения выхода по току получены при весовом соотношении воды к ацетамиду 1/1 и равны 230÷240 %, что соответствует эффективной валентности растворения 1,6÷1,7. При увеличении доли воды в растворе максимум выхода металла по току смещается в область несколько больших плотностей тока, а его значение, как и следовало ожидать, снижается.

Снижение скоростей растворения с ростом концентрации воды в растворе наблюдалось ранее и в других водно-органических системах [1-3]. При этом характер влияния добавок воды на скорость растворения определяется видом органического растворителя, природой применяемой соли и условиями электролиза. Эффект увеличения выхода по току (скоро-

сти растворения) в органических электролитах по отношению к водным является достаточно универсальным. Его проявление наблюдается в средах, относящихся к различным категориям растворителей, существенно отличающихся по своим физико-химическим свойствам.

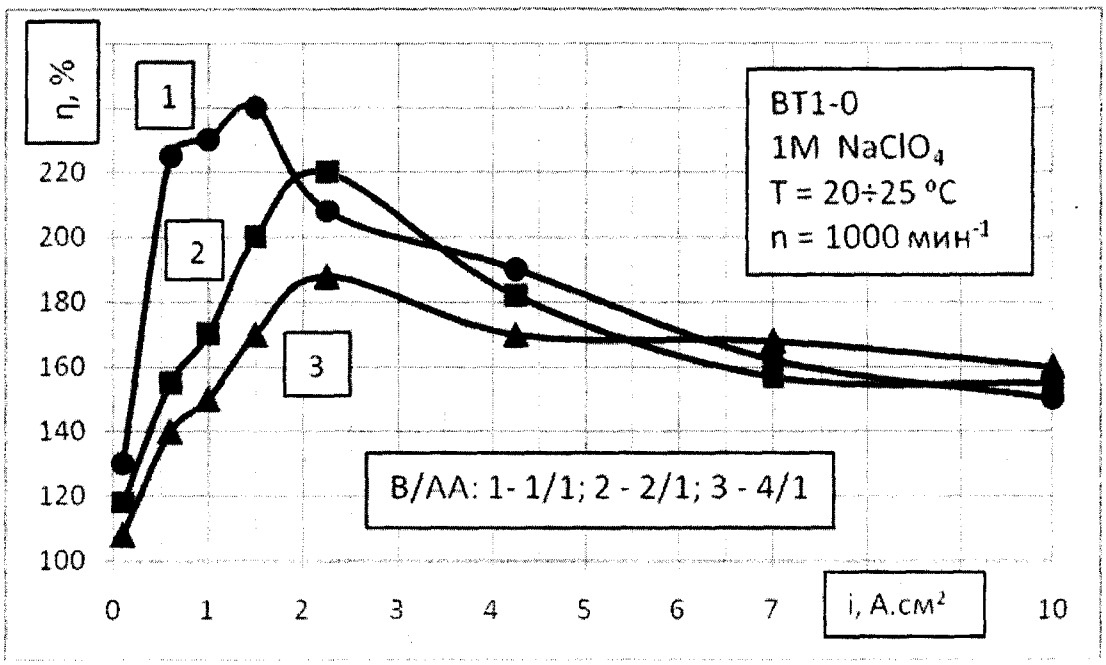


Рисунок 1 – Влияние плотности тока на выход по току растворения титана в растворах с различным весовым соотношением воды (В) к ацетамиду (АА)

Зона блеска с увеличением содержания воды в растворе сужается. Так при изменении весового соотношения воды от 1/1 до 4/1 (вода/ацетамид) зона блеска сужается от $1,0<i<3,0$ до $1,75<i<2,25$ А/см^2. В растворе с соотношением компонентов 4/1 кроме сужения зоны блеска наблюдалось и некоторое снижение отражательной способности поверхности (потускнение). При обработке за пределами указанной зоны наблюдалась серая поверхность.

Следует отметить, что возрастающая зависимость выхода по току от плотности тока предопределяет повышение точности копирования при выполнении операций формообразования. Так, скорость растворения в смеси с весовым соотношением воды к ацетамиду 1/1 увеличивается примерно в 1,7 раза с изменением плотности тока от 0,1 до 0,6 А/см^2, что равносильно изменению МЭЗ в 6 раз в соответствии с [4]. Для многих систем «Ме-электролит» в соответствии с [5] такая степень локализации недостижима, в том числе и при обработке титановых сплавов. Кроме того, ЭХРО титановых сплавов в таком диапазоне плотностей тока в традиционных водных растворах солей невозможна.

Обработка в водно-ацетамидных средах сопровождается достижением в области близкой к максимуму выхода металла по току высокой отражательной способности (блеск). Причем блестящая поверхность находится под рыхлой легко удаляемой пленкой, прочность контакта которой с металлом растет с увеличением содержания воды в растворе.

Рассматривая влияние концентрации соли на выход по току установлено, что наиболее заметно оно проявляется в области максимума выхода по току. При этом с ростом концентрации соли выход по току увеличивается, достигая некоторого установившегося значения (рисунок 2). Так, при концентрации соли 0,5 М в растворе с весовым соотношением воды к ацетамиду 1/1, выход по току равен 185÷190 %, а в 2 М растворе 225÷230 % и выше.

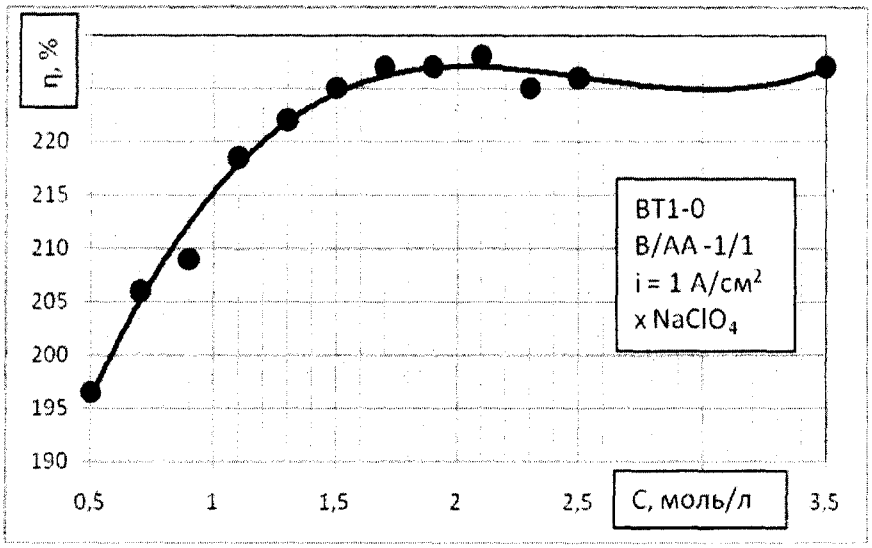


Рисунок 2 – Влияние концентрации соли ($NaClO_4$) на выход по току растворения титана

При построении этой зависимости в полулогарифмических координатах (рисунок 3), получается прямая линия с небольшим наклоном. Полученный результат, с учетом других косвенных данных, позволяет говорить о том, что ограничения процесса растворения связаны как с подводом реагентов, так и отводом продуктов электролиза.

Установлено, что температура раствора для рассматриваемых смесей не влияет на выход по току. Однако блескообразующая способность электролита сохраняется примерно до температур 50 °С. С последующим ее ростом поверхность сначала тускнеет, а затем становится серой, как при обработке в водных средах.

В режиме поддержания заданного потенциала в 1М перхлоратном растворе с весовым соотношением воды к ацетамиду 1/1 выход по току практически не изменялся (таблица 2).

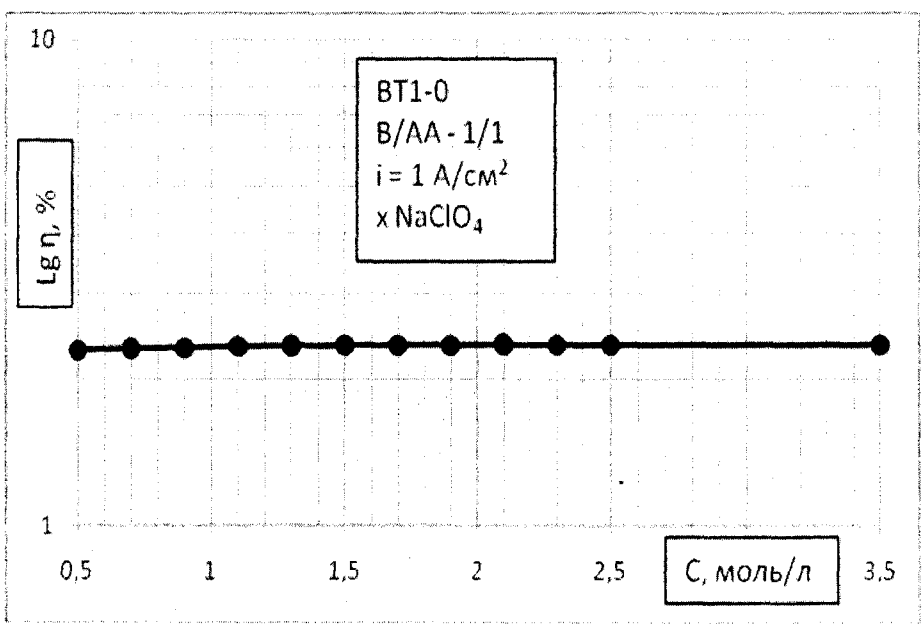


Рисунок 3 – Влияние концентрации соли ($NaClO_4$) на выход по току растворения титана

Таблица 2 – Влияние потенциала на выход по току растворения титана

φ, В	0,005	0,01	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	2,0
η, %	210	204	210	206	204	217	217	204	213

При всех потенциалах наблюдались осцилляции тока в пределах 200÷1000 мА, что позволяет говорить о периодическом росте и разрушении поверхностной пленки в процессе электролиза. Поверхность, в отличие от гальваностатической обработки, серая, за исключением блестящей периферии.

Представляет интерес исследование анодного поведения титана в смешанном хлорид - перхлоратном водно-ацетамидном растворе. Ранее в [6] было показано, что при использовании водных хлорид - перхлоратных растворов может быть достигнут синергический эффект, заключающийся в резком увеличении скорости процесса растворения.

Добавление бром - ионов в 1 М хлорнокислый водно-ацетамидный раствор приводит к монотонному снижению выхода по току (рисунок 4). Синергический эффект, наблюдаемый ранее в водных хлорид - перхлоратных средах, в исследуемом электролите не проявляется.

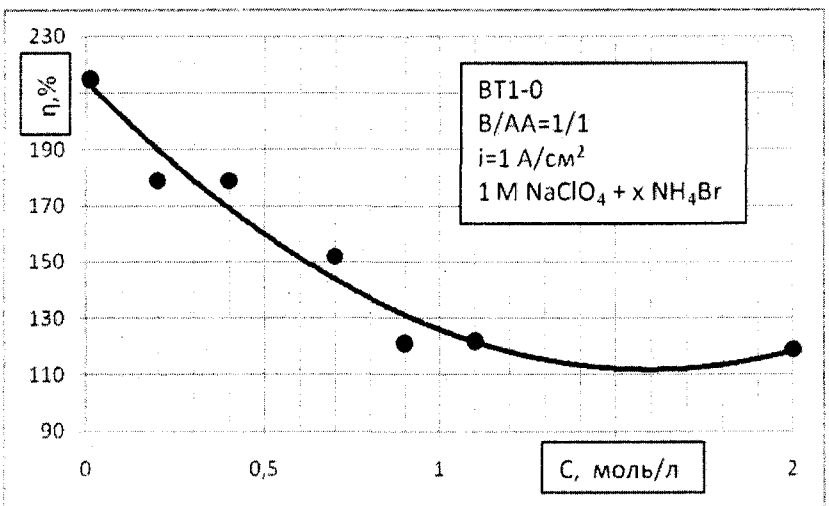


Рисунок 4 - Влияние добавок галоидной соли в 1 М перхлоратный водно-ацетамидный раствор на выход по току растворения титана

Аналогичные результаты были получены и в формамидных хлорид - перхлоратных средах [3].

ВЫВОДЫ

Достижение аномально высоких значений выхода по току в исследуемых хлорнокислых электролитах, влияние природы и концентрации соли, а также взаимного соотношения растворителей на скорость процесса растворения позволяет говорить о том, что непосредственное участие в механизме процесса анодного растворения титана принимают как анионы применяемой соли, так и растворитель. Изменение выхода по току в зависимости от условий электролиза (плотность тока, содержание компонентов раствора) объясняется взаимной конкурирующей адсорбцией компонентов раствора в приэлектродном слое.

Обработка титана и его сплавов в водно-ацетамидном хлорнокислом растворе перспективна как с точки зрения достижения высокой производительности и точности (наличие участка возрастающей зависимости выхода по току от плотности тока), так и получения высокого качества поверхностного слоя.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Саушкин, Б.П. Электрохимическая обработка изделий из титановых сплавов [Текст] / Б.П. Саушкин [и др.]. - Кишинев: Штиинца, 1988. – 198 с.

2.Bannard, I.E., Treble I.R., Brook P.A. The electrochemikal machining of titanium in non aqueous electrolytes [Text] / ISEM-5, Proceedings, Wolfsberg, Switzerland. 1977. - Pp. 39-42.

3.Косенко, П.Я., Маслов А.В., Саушкин Б.П. Анодное растворения титана в многокомпонентных органических электролитах [Текст] / П.Я. Косенко, А.В. Маслов, Б.П. Саушкин // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология, 1992. - Т.35, №6. - С. 67-73.

4.Козак, Е. Два основных аспекта повышения точности ЭХРО при переходе к импульсным режимам [Текст] / Е. Козак, А.Д. Давыдов / Электрохимия, 1983. -Т.19. - №7. - С.867-874.

5.Маслов, А.В. Критерии оценки локализующих свойств растворов электролитов [Текст] / А.В. Маслов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2010. - №2-4 (282). - С.28-32.

6.Петров, Ю.Н., Нистрян А.З., Саушкин Б.П. Исследование анодного поведения титановых сплавов при ЭХРО. II. Двухкомпонентные водные растворы солей [Текст] / Ю.Н. Петров, А.З. Нистрян, Б.П. Саушкин / Электронная обработка материалов, 1983. - №6. - С.18-22.

Александр Владимирович Маслов
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»
Тел: 8 910 352 81 61
E-mail: avmas@mail.ru

Александр Александрович Маслов
Студент Липецкого государственного технического университета»

A.V. MASLOV, A.A. MASLOV

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE ELECTROCHEMICAL MACHINING OF TITANIUM ALLOYS IN AQUEOUS-ACETAMID ELECTROLYTES

The results of the research of titanium machinability in aqueous-acetamid solutions of salts wit the aim of performance assessment, precision and surface quality are given.

***Key words**: electrochemical machining (ECM)*

BIBLIOGRAPHY

[1]Sauškin, B.P., Petrov Ju.N., Nistryan A.Z., Maslov A.V. Electrochemical machining of Titanium alloys [Text] / B.P. Sauškin. - Chisinau: Štiinca, 1988. - P.198.

[2]Bannard, I.E., Treble I.R., Brook P.A. The Electrochemical machining of Titanium in non Aqueous Electrolytes [Text] / I.E. Bannard, I.R. Treble, P.A. Brook. - ISEM-5, Proceedings, Wolfsberg, Switzerland. 1977. - Pp.39-42.

[3]Kosenko, P.Ja., Maslov A.V., Sauškin B.P. Anodic Dissolution of Titanium in multicomponent organic Electrolytes [Text] / P.Ja. Kosenko, A.V. Maslov, B.P. Sauškin // J. News University. J. Series «Chemistry and chemical Technology». - 1992. - Vol.3-5. - № 6. -Pp. 67-73.

[4]Kozak, E. Two main Aspects to improve the Accuracy of ECM when you switch to pulse Modes [Text] / E. Kozak, A.D. Davydov // J. Electrochemistry, 1983. -Vol. 19. - № 7. - Pp.867 - 874.

[5]Maslov, A.V. Criterion for comparative Estimation of localising properties of electrolyte solutions [Text] A.V. Maslov // Scientific journal of Orel State Technical University. J. Series «Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology», 2010. - № 2-4 (282). - Pp. 28-32.

[6]Petrov, Ju.N., Nistryan A.Z., Sauškin B.P. Study on anode Behaviour of Titanium alloys during ECM. II. Two-component aqueous solutions of salts [Text] / Ju.N. Petrov, A.Z Nistryan, B.P. Sauškin // J. Electronic processing of materials, 1983. - № 6. - Pp.18-22.

Alexander Alexandrovich Maslov
Candidate of Technical Sciences (Dr), docent (Associate professor) «State Technical University», Lipetsk
Phone: 8 910 352 81 61
E-mail: avmas@mail.ru

Alexander Alexandrovich Maslov
Student «State Technical University», Lipetsk

УДК 621.91

М.Ш. МИГРАНОВ

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С НАНОСТРУКТУРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований наноструктурных износостойких покрытий.

Ключевые слова: *режущий инструмент, наноструктурное покрытие*

Направленное изменение свойств покрытий путем варьирования их составом, структурой и строением позволяет существенно влиять на контактные характеристики процесса резания. Известно [1], что химический состав, физико-механические и теплофизические свойства покрытий могут значительно отличаться от соответствующих параметров инструментального и обрабатываемого материалов, и, как следствие, покрытие следует рассматривать как своеобразную "третью среду". Причем эта среда, с одной стороны, может заметно изменять поверхностные свойства инструментального материала, с другой, – влиять на контактные процессы, температуру и усилия резания, направленность тепловых потоков и термодинамическое напряженное состояние режущей части инструмента. Процесс трения на контактных площадках передней и задней поверхностей во многом определяется поверхностными свойствами пары трения "инструмент-деталь". Внешнее трение согласно молекулярно-механической теории имеет двойственную природу [2,3], обусловленную объемным деформированием материала и преодолением межатомных и межмолекулярных связей, возникающих между участками трущихся поверхностей.

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения и особенно это характерно для наиболее термодинамически неустойчивых покрытий в виде оксидов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания, т.е с эффектом адаптации к внешним условиям. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, "ювенильных", поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходит разупрочнение "узлов" схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения.

Были исследованы два типа покрытий: обычное монослойное покрытие – (TiAl)N и усовершенствованное покрытие – (TiAl)N. Усовершенствованные покрытия наносились при фильтрации с помощью МДФ на установке типа ННВ-6.6-11. Такая схема позволяет воздействовать на физико-химические и плазмо-химического процессы при нанесении термостойких покрытий за счет увеличения скорости ионизации как металлов, так и химически активных газов. При этом удается практически исключить образование капельных фаз, а также благодаря высокой скорости плазменной ионизации в камере установки и относительно низкой скорости нанесения покрытия, температура вначале кристаллизации низкая. Ионная бомбардировка с низкой энергией растущих пленок может ограничить рост зерен и способствовать образованию нанокристаллического слоя [4].

Поверхностная морфология и микроструктура покрытий была исследована с помощью просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии на установке JEOL JEM-201.

Химический состав вторичных структур, возникающих на поверхности режущего инструмента при трении в процессе резания, исследовался с помощью вторично-ионной масс спектрометрии (ВИМС), оже-электронной спектроскопии (ОЭС – «JXA-8400»; «Jeol» JEM-20

ОЕ; спектрометр «Escalab – MK2», оборудованного электронным прожектором LEG200, ионным прожектором AG6 и анализатором ионной массы SQ300 квадроугольного типа; «Cameca» модели MS-46.

Износ покрытий исследовался при обработке резанием стали 40Х. Обработка велась как с охлаждающей жидкостью, так и без нее. Была исследована износостойкость четырехгранных быстросменных пластинок на основе ТТ8К6 с покрытиями (TiAl)N, определены коэффициент трения на поверхности резания, коэффициент усадки стружки, угол условной плоскости сдвига обрабатываемого материала и измерены составляющие усилий резания с помощью динамометра УДМ-600.

Микротвердость покрытий (TiAl)N измерялась с помощью контрольно-измерительного прибора для определения наноуглублений (выемок) при приложенной нагрузке в 200 мН. Толщина покрытия была измерена с помощью устройства с шаровым кратером с точностью до 0,1 мкм. Адгезия покрытия к подложке определялась с помощью адгезиомера [3].

Проведенные исследования свидетелшьствуют, что два рассматриваемых покрытия близки по стехиометрическому составу, а отношение Al к Ti в обычном (TiAl)N покрытии ниже (0,88) по сравнению с МДФ (1,0). Основная особенность фильтрованных покрытий – это ультрамелкозернистая структура. Размеры зерна составляют примерно 60-80 нм вместо 100-120 нм для обычных (TiAl)N.

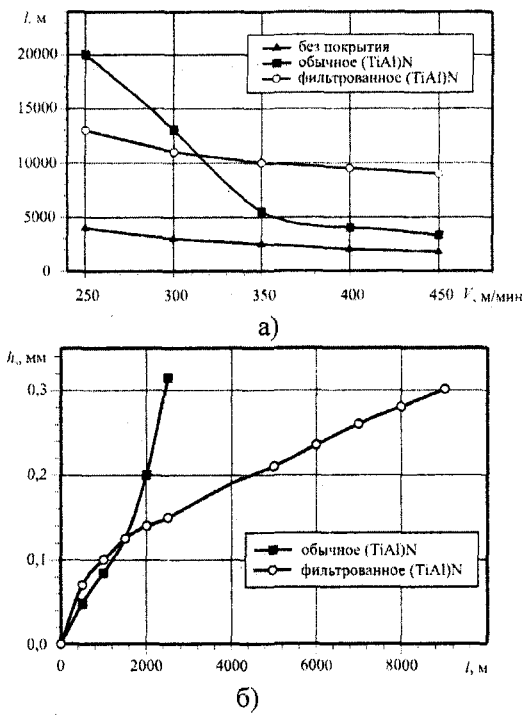


Рисунок 1 - Результаты стойкостных исследований при точении стали 40Х резцами ТТ8К6 с различными покрытиями (S = 0,11 мм/об; t = 0,5 мм):

а) – влияние скорости резания на путь резания (при $h_з$ = 0,3 мм);

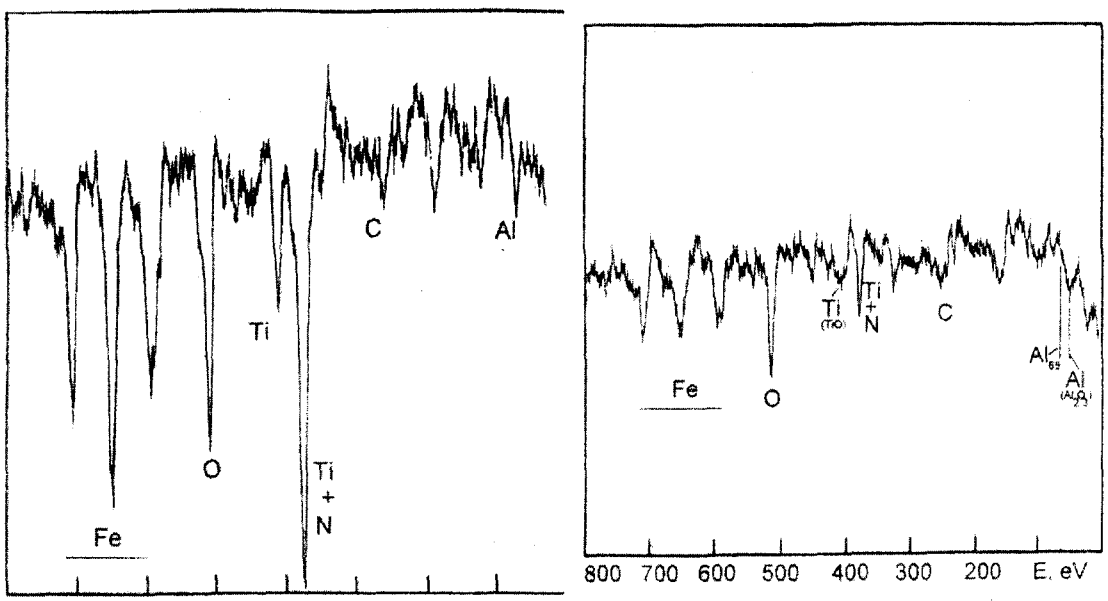
б) – влияние пути резания на износ инструмента по задней поверхности (при V = 450 м/мин)

Износостойкость покрытий в значительной степени зависит от используемых режимов резания. При умеренных скоростях резания (250 м/мин) износостойкость инструмента с обычным покрытием выше фильтрованного, вследствие благоприятного сочетания твердости и адгезии с подложкой (рисунок 1, а). Но износостойкость такого покрытия значительно уменьшается

при скоростях резания выше 350 м/мин. Во время высокоскоростной обработки преобладает окислительный износ инструмента [5, 6], и устойчивость образующихся оксидных пленок с покрытием определяет износостойкость режущего инструмента. Вот почему фильтрованные покрытия с большим сопротивлением окислению имеют и более высокую износостойкость при высоких скоростях резания в диапазоне 450 м/мин (рисунок 1, а). С другой стороны, улучшение в 1,5 раза сопротивления окислению фильтрованных покрытий не может само по себе объяснить увеличение износостойкости инструмента почти в 4 раза по сравнению с обычным покрытием (рисунок 1, а). Для объяснения механизма этого явления были проведены дополнительные исследования поверхностей режущего инструмента и обрабатываемой детали.

Интенсивное трибоокисление поверхности режущего инструмента происходит во время высокоскоростной обработки. На рисунке 2 приведены Оже-электронные спектры для изношенных инструментов с обычными (а) и фильтрованными (б) покрытиями.

Окисление контактных поверхностей очевидно, о чем свидетельствует наличие большого количества кислорода в обоих спектрах. Интенсивные ионные пики соответствуют зонам прилипания материала детали. Линия Ti значительно растянута (рисунок 2, б) в этой зоне; это – результат окислительного процесса. Повышенное количество окиси алюминия наблюдается на спектре фильтрованных покрытий, который показан как сдвиг алюминиевой линии к зоне более низкой энергии (60 эВ).



а) б)

Рисунок 2 - Оже-электронные спектры поверхностей изношенных пластинок с покрытиями (TiAl)N (V = 450 м/мин): а – обычное покрытие (l = 2280 м); б – фильтрованное покрытие (l = 8900 м)

На рисунке 3, а – б представлен ряд спектров положительных вторичных ионов как для обычных, так и фильтрованных (TiAl)N покрытий. На рисунке 3, в – г показаны спектры отрицательных вторичных ионов для обоих покрытий. На обоих положительных вторичных спектрах интенсивность TiO линии высокая и это происходит вследствие интенсивного трибоокисления, которое образует рутилоподобные пленки. Но некоторое количество окиси алюминия образуется только на поверхности фильтрованных покрытий и этот эффект можно наблюдать на спектре отрицательных вторичных ионов (рисунок 3, в).

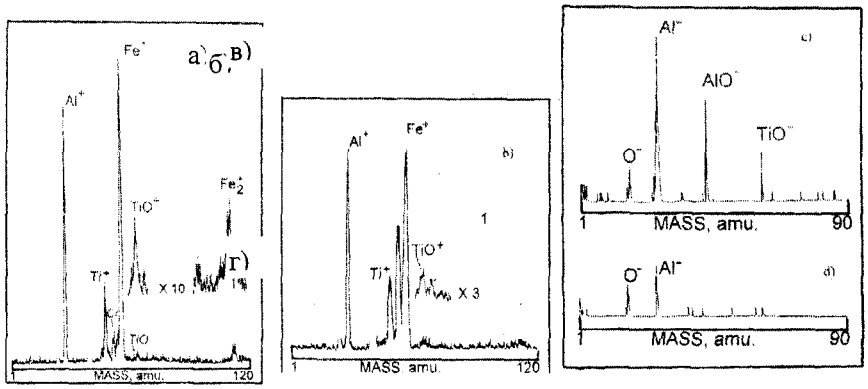


Рисунок 3 - Спектры положительных (а, б) и отрицательных (в, г) вторичных ионов поверхности изношенных пластинок с покрытиями (TiAl)N (V = 450 м/мин): а, б – обычное покрытие; в, г – фильтрованное покрытие.

Таблица 1 - Триботехнические параметры (TiAl)N покрытий

Покрытия	Триботехнические параметры		
	Коэффициент усадки стружки	Угол сдвига	Коэффициент трения на передней поверхности
Обычное	1,35	40,58	0,986
Фильтрованное	1,19	44,49	0,857

Образование пленок оксида алюминия на поверхности резца значительно изменяет тепловые потоки и отвод тепла в стружку. Условия стружкообразования (коэффициент усадки стружки и угол условной плоскости сдвига), а также коэффициент трения по передней поверхности режущего инструмента, измеренные в процессе резания (таблица 1), также показывают значительное улучшение триботехнических параметров для инструментов с фильтрованными покрытиями.

Два основных улучшения в характеристиках поверхностей покрытия можно приписать методу магнитной фильтрации. Первое улучшение связано с полной или частичной фильтрацией фазы «капелька». В результате образуется поверхность с меньшей шероховатостью, которая влияет на уменьшение адгезии (сцепляемости) обрабатываемого материала с инструментальной поверхностью. Второе улучшение связано с уменьшением сил трения и износа фильтрованных покрытий. Уменьшение сил трения важно для условий низкоскоростной обработки в области образования нароста. Но для условий высокоскоростной обработки, когда окислительный износ доминирует, способность покрытий образовывать защитные поверхностные пленки во время трения становятся особенно важными. Эта способность повышается для (TiAl)N фильтрованных покрытий вследствие их нанокристаллической структуры. Нанокристалличность покрытия способствует образованию на поверхности защитного слоя из окиси алюминия [2]. Покрытия с мелкой зернистой структурой имеют большую протяженность границ зерен. В связи с этим необходимы большие пробеги атомов для внешней диффузии алюминия Al и внутренней диффузии кислорода. Это способствует образованию защитных алюминиевых окисных пленок и приводит к увеличению сопротивления поверхности окислению,

что в конечном счете улучшает износостойкость инструмента во время высокоскоростного резания.

Все это свидетельствует о том, что трибоокисление является важным и благоприятным процессом для условий высокоскоростной обработки и происходит оно далеко от равновесного состояния. Это выдвигает на первый план особенности этого процесса по сравнению с обычным изотермическим окислением. Трибоокисление (TiAl)N покрытия имеет своим результатом структурную адаптацию поверхностных слоев к трудным условиям высокоскоростной обработки. Такая адаптация представляет собой процесс, основывающийся на явлении самоорганизации [3], в результате которого происходит повышение износостойкости инструмента. Такой способностью обладают фильтрованные покрытия, которые проявляют свои адаптивные характеристики в условиях высокоскоростной обработки. Кислородосодержащие соединения на металлической основе, которые образуются во время резания, могут действовать как экран, который защищает поверхность инструмента.

Основываясь на данных, представленных на рисунках 1 – 3, можно заключить, что оксидные пленки, которые образуются на поверхности инструмента с (TiAl)N покрытиями, являются смесью из окиси алюминия и рутила, но только слой из оксида алюминия является защитным [6]. Во время высокоскоростной обработки пленки из окиси алюминия, образующиеся на поверхности, ограничивают взаимодействие нижележащих слоев покрытия с материалом детали и на инструменте образуются два типа защитных кислородосодержащих пленок на основе алюминия: аморфноподобные и кристаллические. Эти пленки окиси алюминия способствуют уменьшению износа, так как из-за низкой теплопроводности они препятствуют интенсивному отводу тепла, выработанному во время резания в тело режущего инструмента и значительному улучшению триботехнических параметров (таблица 1). Коэффициент трения на передней поверхности резца для фильтрованных покрытий ниже (0,857) по сравнению с обычным покрытием (0,986). Характеристики стружки также показывают ту же самую тенденцию: коэффициент усадки стружки ниже, а угол условной плоскости сдвига выше для фильтрованного покрытия по сравнению с обычными (TiAl)N покрытиями (таблица 1). В результате благоприятных изменений в условиях трения, интенсивность изнашивания резцов с фильтрованными покрытиями уменьшается (рисунок 1, б) и, таким образом, значительно повышает износостойкость инструмента.

На основании проведенных исследований можно очертить некоторые общие тенденции, связанные с будущим развитием (TiAl)N покрытий для использования при высокоскоростной обработке. Для того чтобы повысить износостойкость и приспособляемость этих покрытий, необходимо образование в рабочей зоне режущего инструмента обоих типов защитных пленок из оксида алюминия (кристаллической трибокерамической и аморфноподобной) во время высокоскоростной обработки. Этого можно достигнуть, например, путем оптимизации химического состава покрытия, а также преобразования его структуры в уровень наношкалы, в частности, вследствие применения МДФ.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями [Текст] / А.С Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

2. Fox-Rabinovich, G.S. Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting [Text] / G.S. Fox-Rabinovich [etc.]. / Wear. 206. - 1997. - Pp. 214.

3. Шустер, Л.Ш., Мигранов М.Ш. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия. Патент на полезную модель № 34249 от 24.06.2003 г.

4. Бершадский, Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем [Текст] / Л.И. Бершадский. - Киев: Знание, 1981. – 35 с.

5. Польцер, Г. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация [Текст] / Г. Польцер, В. Эбиленг, А. Фирковский // Трение и износ. - 1988. - Т.9, №1. – С. 12.

6. Шустер, Л.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке [Текст] / Л.Ш. Шустер [и др.] – М.: Машиностроение, 2008. - 318 с.

Мигранов Марс Шарифуллович
Доктор технических наук, профессор
Россия, г. Уфа
Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), 450000, г.Уфа - центр, ул. К. Маркса, 12,
кафедра ОКМиМ.
Тел. (3472) 73-07-34.
E-mail: migmars@mail.ru

M.Sh. MIGRANOV

WEAR RESISTANCE OF THE CUTTING TOOL WITH A NANO-STRUCTURAL COVER

In article results of experimental researches of nano-structural antiwear coatings are resumed.

Key words: the cutting tool, nano-structural covering

BIBLIOGRAPHY

[1]Vereschaka, A.S. Working capacity of the cutting tool with an antiwear coatings [Text] / A.S. Vereschaka. - Moscow: Mashinostroenie, 1993. - 336 p.

[2]Fox-Rabinovich, G.S. Characteristic features of alloying HSS – based deformed compound powder materials with consideration for tool self – organization at cutting [Text] / G.S. Fox-Rabinovich [etc.]. / Wear. 206. - 1997. – Pp. 214.

[3]Shuster, L.S., Migranov M. Sh. The device for probe adhesive interactions. The patent for a useful model. 34249 from 6/24/2003

[4]Bershadsky, L.I. Self-organizing and reliability of tribosystems [Text] / L.I. Bershadsky. - Kiev: Znanye, 1981. - 35 p.

[5]Poltser, G. An external friction of solids, dissipative structures and self-organizing [Text] / G. Poltser, V. Ebileng, A. Firkovsky // the Friction and deterioration. - 1988. - Part 9, No.1. - Pp. 12.

[6]Shuster, L.S. Coverings and lubricant in highly-temperature mobile interfaces and metal working [Text] / L.S. Shuster [etc.]. - Moscow: Mashinostroenie, 2008. - 318 p.

Migranov Mars Sharifullovich
Dr.Sci.Tech., professor
Russia, Ufa
Ufa state aviation technical university (USATU), 450000, Ufa - center, K.Marx's street, 12,
Chair OkMiM.
Phone. (3472) 73-07-34.
E-mail: migmars@mail.ru

УДК.621.9.025

Ю.П. РАКУНОВ

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В статье рассматриваются научные основы и методология системы многоуровневой базовой технологии, использующие нисходящее и восходящее проектирование технологических процессов (ТП) методом «анализа-синтеза» конструкторско-технологической информации.

Ключевые слова: *технологическая подготовка производства, многоуровневая базовая технология, автоматизация проектирования технологических процессов, метод «анализа-синтеза».*

Система автоматизации проектирования технологических процессов (САПР ТП) включает методику выбора схем базирования и установочных приспособлений, типоразмеров инструмента и синтеза инструментальных наладок, в том числе, групповых, назначения, выбора или расчёта режимов обработки при разработке надёжных ресурсосберегающих процессов, обеспечивающих требуемое качество деталей машин и приборов.

В современной специальной литературе излагаются методические основы автоматизированного проектирования ТП в машиностроении, где основное внимание уделено процессам механической обработки заготовок на станках с ЧПУ и гибких производственных систем [1]. Представлены типовая структура САПР ТП и фрагменты автоматизации проектирования технологических детале-операций и переходов на отдельных этапах ТП.

Однако существующим САПР присущи принципиальные недостатки:

– смешение уровней информации на различных уровнях технологии;

– принятие решений при недостатке информации или её избытке, взятой с других уровней технологии;

– отсутствие типажей инструментов для осуществления индивидуальной и, особенно, групповой обработки;

– отсутствие конкретных технологических рекомендаций по назначению или выбору режимов резания, а также данных по стойкости инструментов и минимально необходимому количеству проходов (рабочих ходов).

Эти недостатки не дают возможности разрабатывать рациональные инструментальные наладки для конкретных установов (детале-операций) и оптимизировать ТП, например, токарной обработки конкретных деталей или групп деталей (заготовок).

Целью создания системы МБТ является развитие технологии как точной науки путём выявления закономерностей и установления количественных взаимосвязей по различным направлениям и предметам исследования.

Предметом исследования является автоматизация разработки МБТ на примере токарной обработки преимущественно прецизионных деталей.

Объектом исследования является технологическая (физическая) модель изделия на основе единой системы признаков, описывающих типоразмеры деталей, технологические методы и средства, обеспечивающие номенклатуру, диапазоны и точность формируемых свойств обрабатываемых поверхностей.

Согласно предложенному информационному методу «анализа-синтеза», или объектно-структурному подходу, проектирование ТП следует начинать с наименее информативноёмких задач [2]. При решении задач следующего (нижнего) уровня используют строго дозированную информацию (принадлежащую только к этому уровню) и информацию более высокого уровня, необходимую и достаточную для решения задачи на этом уровне, например, типоразмера, т.е. перехода в структуре ТП. В этом процессе (итерации) смешение уровней информации недопустимо [3].

Разработку вариантов ТП ведут в двух противоположных направлениях (нисходящем – восходящем): маршруты дифференцируют до уровня базовых установов (типоразмеров детале-операций), а затем техническое содержание конкретного исполнения (моделей) установов синтезируют из технологических элементов нижних уровней: позиций, переходов и рабочих ходов (проходов) [4].

Создание систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов (ТП) на основе конструктивно-технологических параметров предмета производства (в частности — детали) является одной из наиболее актуальных и нерешенных пока проблем автоматизации проектирования. Главной причиной этого является отсутствие общего решения проблемы синтеза структур объектов проектирования инвариантного их классу [5].

В исследованиях ([1,5,9] и др.) убедительно показано, что сложность автоматизации проектирования (синтеза) структуру ТП объясняется большой совокупностью правил проектирования, слабой их формализацией, динамичностью схем их применения, определяемых конкретными производственными условиями. Современные системы проектирования технологии характеризуются применением эвристических алгоритмов формирования структур, строго ориентированных на ограниченное число производственных ситуаций, поэтому системы плохо тиражируемы и не адаптивны. Решения, формируемые системой, часто требуют глубокой корректировки. При проектировании структуры ТП требуется ввести большой объём необходимых исходных данных об изделии и производственной среде. Для корректировки решений, облегчения процесса кодирования и ввода исходных данных об изделии применяют диалог пользователя с системой. Однако, даже диалог не позволяет повысить эффективность проектирования структуры ТП, если алгоритмы не были рассчитаны на конкретную производственную ситуацию. Оперативно изменить или дополнить алгоритмическое и программное обеспечение не представляется возможным.

Процесс варьирования параметров (параметрической настройки) значительно более формализован и менее зависим от производственной ситуации, поэтому в последнее время появилось много систем, в которых автоматически (или автоматизировано) выполняется параметрическая настройка, а структура ТП формируется вручную, и информация о ней вводится в систему как исходные данные. Такие системы легко адаптируются к производственным условиям, требуют введения относительно небольшого объёма исходных данных и легко воспринимаются специалистами при их внедрении. Однако, эффективность решений в таких системах определяется квалификацией технолога, – отсутствует возможность оптимизировать структуру объекта проектирования.

За последние 10–15 лет состояние автоматизации синтеза структур ТП изменилось мало. Проблема автоматизированного синтеза единичных и групповых ТП остаётся важнейшей и наиболее актуальной задачей САПР ТП.

В наиболее часто встречающихся оценках состояния автоматизированного синтеза ТП указывается, что при его реализации маршрутная и операционная технологии должны создаваться на основе общих закономерностей проектирования или эвристик, справедливых для ограниченного класса деталей и определённых видов и типов производств. Утверждается, что сформировать закономерности проектирования и критерии ТП, с помощью которых можно было бы разрабатывать весь процесс изготовления деталей, на сегодняшний день не представляется возможным. Теория синтеза структур технологических объектов, несмотря на усилия исследователей, разработана недостаточно.

Структура САПР ТП и состав её подсистем (прежде всего проектирующих) определяются реализуемой в ней методологией проектирования. Существуют две основные методологии проектирования ТП изготовления изделий машиностроения:

– проектирование на базе использования ТП-аналогов;

– синтез единичных ТП на основе конструктивно-технологических характеристик изготавливаемых изделий.

Процессами-аналогами называют типовые и групповые ТП. Единичный ТП также можно проектировать на основе процессов-аналогов. В этом случае его структура и содержание технологических детале-операций в значительной мере определяются структурой процесса-аналога.

При использовании метода синтеза ключевым вопросом построения САПР ТП является вопрос о том, как в данной системе осуществляется синтез структуры объектов проектирования: – рабочих ходов (проходов), переходов, позиций, установов и технологических этапов.

Существуют принципиально различные подходы к построению САПР ТП. Известны несколько классификаций методов проектирования ТП, положенных в основу создания соответствующих систем [5].

В настоящее время САПР детале-операционной технологии механической обработки действует на основе типовых технологических процессов-аналогов, что вполне оправдано только при наличии достаточно представительных групп деталей, объединённых конструктивной и технологической общностью. Сейчас, однако, такой подход уже представляется рутинным, поскольку не позволяет разрабатывать оптимальные ТП, адаптированные к характеру конкретного производства с учётом его серийности и оснащённости новыми типоразмерами инструмента, оснастки и оборудования.

При разработке технологии производства новых видов изделий при отсутствии типовых ТП, эффективным методом оптимального решения задачи является метод синтеза, т.е. интегрирования по определённым правилам более высоких уровней ТП из их составляющих: переходов из проходов (рабочих ходов), установов и позиций из переходов, этапов из установов, маршрутов из этапов [6].

Для реализации этого подхода разработана структура документов базовой технологии (БТ) в виде таблиц-матриц, что позволяет формализовать процесс синтеза различных уровней ТП: автоматизированного выбора позиционных инструментальных наладок (ПзИН), условий осуществления проходов, переходов, позиций и установов (детале-операций).

Рабочие таблицы-матрицы первичной подсистемы по горизонтали начинаются с характеристик технологических видов поверхностей: их геометрической формы, взаимного положения и сопряжения. Путём добавления соотношений параметров поверхностей и технологических признаков метода обработки получаем характеристику типов, определяющих номенклатуру поверхностей, формирование которых возможно данным методом. Дальнейшее дополнение таблиц-матриц информацией о диапазонах всех геометрических параметров и физических свойств, а также точности их выполнения на уровне отдельных проходов и их совокупности, т.е. переходов, даёт полную характеристику типоразмеров поверхностей детали.

Первичная подсистема БТ представлена на примере прецизионного точения и предусматривает по входным данным о виде и типе поверхностей вращения, их взаимном положении и сопряжении, размерах и требуемых качественных свойствах получение следующей выходной информации:

- тип и типоразмер (ТР) режущего инструмента (РИ) (рисунок 1) [7];
- материал и геометрия активной части РИ;
- модель РИ и параметры ПзИН для выбранного ТР станка (рисунок 2);
- режимы проходов: глубина, подача, скорость резания, СОЖ;
- необходимое исходное состояние поверхности по каждому проходу;
- номенклатура и последовательность проходов, т.е. состав перехода;
- прогнозируемый ресурс ПзИН, инструментоёмкость, станкоёмкость и другие технико-экономические показатели каждого перехода.

Алгоритм синтезирования переходов по таблицам-матрицам состоит из следующих действий:

1. Определение номенклатуры проходов по каждой поверхности в их обратной последовательности, т.е. от конечного (финишного) прохода до начального. Таким образом устанавливается полная номенклатура проходов при выполнении перехода в ТР установа, на детале-операционном эскизе которого указаны все обрабатываемые при этом поверхности.

2. Установление хронологически неразрывной последовательности проходов по поверхностям контуров обработки, которые обходит каждая модель РИ конкретного исполнения; при этом состав проходов образует переход.

Переход – номенклатура и последовательность (состав) проходов, выполняемых одной моделью позиционной инструментальной наладки при неизменной позиции (степенях свободы) заготовки относительно векторов инструмента в координатах оборудования.

Оптимизация синтеза групповых инструментальных наладок для токарных станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР инструментов в групповом производстве,

добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены инструментов после достижения максимально допустимого износа каждого из них [8].

Работа по синтезу (интегрированию) модели установа начинается с первичной подсистемы МБТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий технологической наследственности на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей. Это позволяет сопоставлять технологическую модель детали с моделью технологических методов, формирующих свойства на всех этапах производства и подбирать оптимальный метод и минимизировать количество типоразмеров инструментов, станкоёмкость и технологическую себестоимость [8].

Известен ряд концептуальных подходов к решению проблемы синтеза структур ТП. Однако каждый из них обладает рядом недостатков, в том числе и принципиальных, которые делают невозможным создание эффективно работающих САПР ТП на их основе [9].

Метод синтеза хотя бы один раз требует формирования внешних связей между элементами для создания из них элементов более высокого уровня. Этот метод предполагает определение состава элементов, построение новых связей, проверку их достоверности и параметрическую настройку с использованием логических правил и аналитических зависимостей. Проектирование можно вести, как с использованием аналогов, так и без них. При использовании аналогов необходимо включать в аналог новые элементы или существенно изменять их последовательность [10].

Подсистема синтеза конкретизирует содержание и дополняет номенклатуру деталеопераций последовательным синтезированием номенклатуры и последовательности (состава) входящих технологических событий уровней установов и переходов из первичных элементов технологических процессов, с учетом конкретных моделей оборудования и возможностей групповых и индивидуальных (специальных), позиционных и детале-операционных (установочных) инструментальных наладок, а также управляющих программных наладок.

Заполнение таблицы-матрицы интегрирования установов по уровням для конкретной модели (налаженного) оборудования производится в определённой последовательности:

1. Разбивка всей номенклатуры переходов (по таблице-матрице [4]) с учётом точности взаиморасположения (несоосность, непараллельность, неперпендикулярность) обрабатываемых поверхностей на уровне подсовокупности (типоразмеров) переходов, осуществляемых при обработке заготовки с одной стороны, т.е. на совокупность переходов составляющих номенклатуру позиций токарных установов. При наличии контршпинделя обе позиции выполняются в одном установе.

2. Выбор установочной базы – схемы базирования и типоразмера установочной оснастки, базовой поверхности на заготовке, исходя из взаиморасположения совокупностей типоразмеров поверхностей – контуров обработки. Формирование установочной наладки.

3. Выбор типоразмера базовой модели (или нескольких рабочих моделей) оборудования из технически удовлетворяющих требованиям по диапазону и точности, количеству и схеме рабочей зоны инструмента, организационным соображениям (наличие выбранных станков на участке, в цехе, с учётом загруженности станков) по типажу с технологическими параметрами и возможностями оборудования.

4. Выбор номенклатуры инструментов в инструментальной наладке для каждого установа. Учитывается необходимое количество позиционных наладок, исходя из напряженности переходов и ресурса каждой позиционной инструментальной наладки с учетом возможности их дублирования для повышения стойкости наиболее напряженной, т.е. менее ресурсостойкой. Как правило, это инструмент для обработки наружных цилиндрических поверхностей (могут быть внутренние или торцевые – у деталей с преобладающими площадями обрабатываемых торцов) (блок-схема 1) [10].

5. Выбор конкретной (рабочей) модели оборудования из возможных (п. 3) по номенклатуре установочных инструментальных наладок. Отбор оптимальной модели производится по количеству устанавливаемых инструментов, обеспечиваемой точности обработки и экономическим показателям.

6. Определение последовательности переходов (типовая схема последовательности обработки деталей типа «валов» и «втулок»).

7. Уточнение (синтезирование) рабочей модели оборудования, с установлением конкретных инструментальных наладок (схема 2) [10].

8. Оформление операционной карты установа, установочной инструментальной оснастки, с оснащением необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

9. Уточнение количества установов в технологическом этапе.

Оптимизация модели установа проводится по критерию максимальной производительности при обеспечении необходимых показателей качества деталей. Характер оптимизации зависит от вида производства и, как следствие этого, организационно-технологических условий обработки:

•групповая оптимизация осуществляется для случая разработки технологических процессов в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства, когда обработка конкретной детали не загружает станок в течение смены (определяется критической партией запуска методом «прямого счёта») [8];

•индивидуальная оптимизация осуществляется в случае разработки технологического процесса на деталь, обеспечивающую загрузку оборудования в течение одной или более рабочих смен. Инструмент при этом оптимизируется под изготовление этой массовой детали, включая, при необходимости, изготовление спецрезцов повышенной стойкости;

•индивидуально-групповая оптимизация является компромиссной между индивидуальной и групповой. В этом случае используются групповые инструментальные наладки, с возможностью смены отдельных позиционных наладок для обработки деталей, подзагружающих групповую наладку до полной загрузки.

Основными критериями оптимальности состава и параметров установочных (деталеоперационных) ПзИН являются:

- для РИ, осуществляющих финишные проходы – минимальная интенсивность износа, т.е. максимальная площадь обработанной поверхности при минимальном или регламентированном размерном износе;
- для РИ, осуществляющих предварительные проходы – максимально возможная производительность (съём определённого объёма материала в единицу времени), оцениваемая минимальным машинным временем или минимальной себестоимостью обработки.

Метод синтеза может быть эффективно использован, как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей в условиях современного мелкосерийного многономенклатурного производства [11].

Применение метода синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов на профессиональных персональных компьютерах при правильном заполнении таблиц-матриц технологом средней квалификации даёт возможность получения оптимального для существующего производства ТП механической обработки высокоточных токарных деталей простой и сложной форм.

Единая система технологических признаков, учитывающих номенклатуру, диапазон и точность свойств деталей позволяет обеспечить сопоставление, подбор и необходимую эффективность при использовании компьютерной техники.

Практическое использование системы МБТ даёт возможность создания базы знаний и баз данных системы автоматизированного сквозного проектирования изделий точного машиностроения, т.е. интегрированных САПР: CAE/CAD/CAM/CAPP. Это особенно важно для разработки полноценной системы CAM/CAPP (автоматизированная технологическая подготовка производства и проектирование детале-операций ТП).

Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки производства.

Внедрение унифицированного режущего инструмента и режимов резания в совокупности с использованием методики синтеза групповых инструментальных наладок приведёт к

повышению эффективности машиностроительного производства и производительности труда в 1,8...2 раза.

Система МБТ является основой, позволяющей предсказывать перспективные направления развития технологии и совершенствования производства, а также исключить неоптимальные, неэффективные технологии. Она создаёт основы для пересмотра физической сущности технологии, её информационного, программно-математического и материального обеспечения.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Акулович, Л.М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроения [Текст] : учеб. пособие / Л.М. Акулович, В.М. Шелег. – Минск: Новое знание. – М: ИНФРА-М, 2012. – 488 с.

2.Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

3.Ракунов, Ю.П. Разработка системы многоуровневой базовой технологии [Текст] / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2012. - № 1. – С.40-46.

4.Ракунов, Ю.П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии [Текст] / Ю.П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2012. - № 3. – С. 23-31.

5.Кондаков, А.И. САПР технологических процессов [Текст] : учебник для студентов высших учебных заведений / А.И. Кондаков. – М.: «Академия»; 2007. – 272 с.

6.Ракунов, Ю.П. Идеология и структура построения системы многоуровневой базовой технологии [Текст] / Ю.П. Ракунов, Н.А. Золотова // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004.

7.Ракунов, Ю.П. Типаж унифицированных резцов с назначением режимов резания для прецизионных токарных станков с программным управлением [Текст] / Ю.П. Ракунов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2011 г. – С. 399-404.

8.Ракунов, Ю.П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ [Текст] / Ю.П. Ракунов // Конструктор-машиностроитель. – 2010. – № 3, 5.

9.Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии [Текст] / И.П. Норенков. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002.

10.Ракунов, Ю.П. Методология построения подсистемы синтеза многоуровневой базовой технологии в групповом производстве [Текст] / Ю.П. Ракунов, Н.А. Золотова // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004.

11.Ракунов, Ю.П. Оптимизация условий обработки высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов на прецизионных станках с ЧПУ [Текст] / Ю.П. Ракунов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 13-й междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2011 г. – С. 393-398.

Юрий Павлович Ракунов
Кандидат технических наук, доцент
ФГОУ ВПО «Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства»
Тел: (495) 941-28-77; 8(916) 810-71-26
e-mail: Rakunov1991@mai.ru

Yu.P. RAKUNOV

THE SCIENTIFIC FOUNDATION AND PRINCIPLES OF MULTITIER BASIC TECHNOLOGY SYSTEM DESIGN

The scientific foundation and methodology multitier basic technology system design, used top-down and bottom-up methods designing "analysis-synthesis" of construction-technological information.

Keywords: *process-layout preparation, multitier basic technology, computer-aided system design technological processes, "analysis-synthesis" method.*

BIBLIOGRAPHY

[1]Akulovich, L.M. Fundamentals automated design system technological processes in machine-building [Text]: educational book (textbook) / L.M. Akulovich, V.K. Sheleg. – Minsk: New Knowledge. – Moscow: INFRA-M, 2012. – 488 p.

[2]Knowledge basis of intellectual systems [Text] / T.A. Gavrilova, V.F.Khoroshevsky. – SPb.: Piter, 2001. – 384 p.

[3]Rakunov, Yu.P. Design of multitier basic technology system [Text] / Yu. P. Rakunov // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2012. - № 1. – Pp. 40-46.

[4]Rakunov, Yu.P. Primary subsystem of multitier basic technology [Text] / Yu.P. Rakunov // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2012. - № 3. – Pp. 23-31.

[5]Kondakov, A.I. Computer-aided design system technological processes: educational book for students [Text] / A.I. Kondakov. - Moscow: Academia, 2007. – 272 p.

[6]Rakunov, Yu.P. Ideology and structure design for multitier basic technology system [Text] / Yu.P. Rakunov, N.A. Zolotova // Collected articles of science-practical conference "Technological provision quality of machines and apparatuses". – Penza, 2004.

[7]Rakunov, Yu.P. Types unificated cutting tools and system to order finishing conditions for CNC lathes [Text] / Yu.P. Rakunov // Collected articles of 13-th International science-practical conference. "Technology repairing, renewal, hardening machine components, of equipment, tools and jigging at nano- to macrograde". – SPb. - 2011. - Pp. 399-404.

[8]Rakunov, Yu.P. Optimization synthesis tooling setting up for CNC lathes [Text] / Yu.P. Rakunov // J. Constructor-machine-builder. – 2010 – № 3, 5.

[9]Norenkov, I.P. Informational maintain science intensive products. CALS – technology [Text] / I.P. Norenkov. – Moscow: Publishers MFTU name Bauman, 2002.

[10]Rakunov, Yu.P., Zolotova N.A. Methodology structure subsystem synthesis of multitier basic technology for grouping production [Text] / Yu.P. Rakunov, N.A. Zolotova // Collected articles of sci.-pract. conf. "Technological provision quality of machines and apparatuses". – Penza, 2004.

[11]Rakunov, Yu.P. Optimization machining conditions accuracy requirement turned workpieces from hard-cutting materials by precise CNC lathes [Text] / Yu.P. Rakunov // Collected articles of 13-th International science-practical conference. "Technology repairing, renewal, hardening machine components, of equipment, tools and jigging at nano- to macrograde". – SPb. - 2011. - Pp. 393-398.

Yury Pavlovich Rakunov
Cand. Tech. Sci., senior lecturer
FSEI HVT "Moscow State Academy
of Municipal Services and Building"
Phone: 941-28-77; 8(916) 810-71-26
E-mail: Rakunov1991@mai.ru

УДК 621.924.6

В.И. СОТНИКОВ

АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОГИБАЮЩЕМ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ

В статье рассматривается алгоритм расчета и минимизации погрешности формообразования эвольвентной поверхности зубьев цилиндрических прямозубых колес при зубофрезеровании дисковыми огибающими фрезами. Приведены результаты расчетов на основе использования алгоритма и представлены практические рекомендации.

Ключевые слова: *алгоритм; погрешность формообразования; эвольвентная поверхность; огибающее зубофрезерование.*

При изготовлении зубчатых колес для формирования эвольвентного профиля зубьев широко применяются процессы зубонарезания, основанные на использовании схемы огибания. Эта схема характеризуется тем, что профилирующие режущие кромки зубьев инструмента последовательно занимают положения касательных к профилю зубьев колеса в различных по его высоте точках. Схема огибания может быть реализована либо за счет кинематики процесса зубонарезания, либо за счет конструкции инструмента, который выполняется с конструктивной подачей режущих кромок зубьев.

Схема кинематического огибания реализуется при наличии движений обката зуборезного инструмента и нарезаемого колеса, при котором их центроиды перекатываются друг по другу без скольжения. Такое огибание эвольвентного профиля является центроидным и используется при зубонарезании червячными фрезами, зуборезными долбяками или гребенками [1].

Схема конструктивного огибания характеризуется тем, что профилирующие режущие кромки зубьев инструмента располагаются под изменяющимися от зуба к зубу профильными углами по касательным к эвольвентному профилю зуба колеса, обеспечивая конструктивную подачу. Такая схема огибания является бесцентроидной и положена в основу работы дисковых огибающих зуборезных фрез [2] и огибающих зуборезных протяжек [3].

При использовании процесса огибающего зубофрезерования дисковыми зуборезными фрезами необходимо учитывать особенности формообразования эвольвентных поверхностей зубьев колеса. В соответствии с теорией формообразования поверхностей режущим инструментом [4], эвольвентная номинальная поверхность зубьев цилиндрического прямозубого колеса формируется как огибающая однопараметрического семейства производящих поверхностей дисковой фрезы. Параметром семейства производящих поверхностей является подача фрезы вдоль прямолинейной направляющей зуба колеса. Причем профиль производящей поверхности фрезы должен соответствовать профилю впадины обрабатываемого зубчатого колеса.

В свою очередь, производящая поверхность огибающей дисковой фрезы является поверхностью вращения и формируется как огибающая однопараметрического семейства поверхностей резания, которые последовательно описывают прямолинейные профилирующие режущие кромки зубьев фрезы при ее вращении. Параметром этого семейства поверхностей резания является конструктивная подача прямолинейных режущих кромок зубьев фрезы, которая выражается в изменении углов профиля их расположения вдоль эвольвентной образующей.

Использование схемы огибания приводит к образованию «чешуйчатого» рельефа эвольвентной поверхности зуба колеса, представленного на рисунке 1. Этот рельеф соответствует реальной поверхности зуба колеса и имеет отклонения от номинальной эвольвентной поверхности как в поперечном к зубу колеса направлении – огранка эвольвентного профиля h_{oz}, так и в продольном направлении – волнистость поверхности зуба $h_в$. Максимальные отклонения реальной поверхности от номинальной имеют место в точках пересечения соседних поверхностей резания (точки A, B, C и D). Эти отклонения составляют погрешность формообразования h_1, которая является частью профиля шероховатости, обусловленной геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента [5].

Форма поверхностей резания определяется профилем режущих кромок зубьев фрезы и зависит от их положения относительно оси ее вращения. Для повышения технологичности изготовления фрезы режущие кромки её зубьев выполняются прямолинейными. Поэтому поверхности резания, в наиболее общем случае формообразования, имеют форму однополостного гиперболоида вращения, так как прямолинейные режущие кромки зубьев фрезы и ось её вращения не лежат в одной плоскости, а располагаются со смещением как непересекающиеся скрещивающиеся прямые линии. Уравнение поверхности резания, образуемое прямолинейной режущей кромкой зуба фрезы, в системе координат инструмента в канонической форме имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{a^2}-\frac{z^2}{c^2}=1, \quad (1)$$

где a и c – соответственно размер действительной и мнимой полуоси однополостного гиперболоида вращения. Размер a определяет величину смещения режущей кромки зуба фрезы относительно её осевой плоскости.

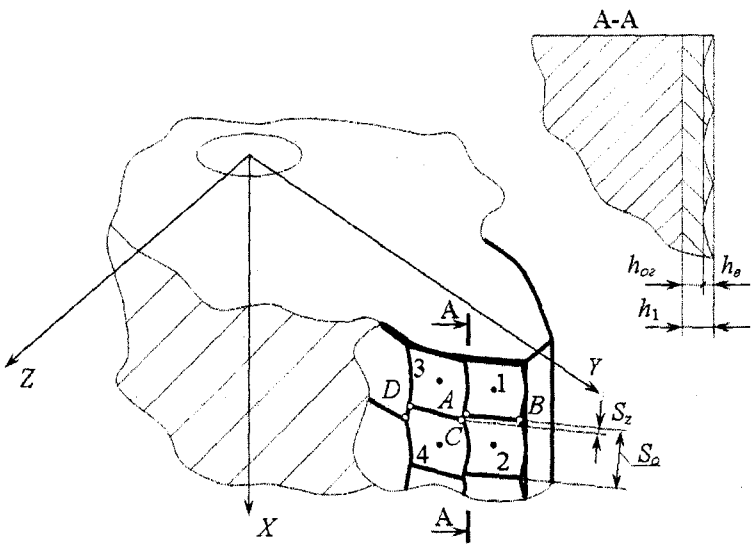


Рисунок 1 – Рельеф эвольвентной поверхности зуба цилиндрического прямозубого колеса, формируемый огибающей дисковой зуборезной фрезой

В сечении гиперболоида плоскостью $x = a$ получим пару скрещивающихся прямолинейных образующих, которые определяют уравнение режущей кромки зуба фрезы в этой плоскости

$$z=\pm\frac{c}{a}\cdot y, \quad (2)$$

Параметры гиперболоида связаны между собой соотношением

$$c=a\cdot tg\varphi_i, \quad (3)$$

где φ_i - угол профиля прямолинейной режущей кромки зуба фрезы в плоскости передней поверхности.

Анализ зависимостей (1…3) показывает, что при уменьшении величины смещения a прямолинейных режущих кромок зубьев фрезы относительно оси ее вращения, поверхность резания в форме однополостного гиперболоида вращения постепенно изменяет свой вид и в предельном случае, при $a = 0$, превращается в коническую поверхность резания с уравнением

$$x^2\cdot tg^2\varphi_i+y^2\cdot tg^2\varphi_i-z^2=0$$

Рельеф поверхности зуба цилиндрического прямозубого колеса, формируемый зубьями огибающей дисковой зуборезной фрезы можно представить схемой уравнений соседних поверхностей резания 1, 2, 3 и 4

$$x^2\cdot tg^2\varphi_i+(a_w-y)^2\cdot tg^2\varphi_i-(b_i-z)^2=a^2\cdot tg^2\varphi_i \quad (4)$$

$$(x-S_o)^2\cdot tg^2\varphi_i+(a_w-y)^2\cdot tg^2\varphi_i-(b_i-z)^2=a^2\cdot tg^2\varphi_i \quad (5)$$

$$\left(x-\frac{S_o}{z_o}\right)^2\cdot tg^2\varphi_{i+1}+(a_w-y)^2\cdot tg^2\varphi_{i+1}-(b_{i+1}-z)^2=a^2\cdot tg^2\varphi_{i+1} \quad (6)$$

$$\left(x - S_o - \frac{S_o}{z_o}\right)^2 \cdot tg^2\varphi_{i+1} + (a_w - y)^2 \cdot tg^2\varphi_{i+1} - (b_{i+1} - z)^2 = a^2 \cdot tg^2\varphi_{i+1} \quad (7)$$

где x, y и z – текущие координаты поверхностей резания в системе координат XYZ, связанной с зубчатым колесом;

a – смещение режущих кромок зубьев фрезы относительно её осевой плоскости;

a_w – расстояние между осями фрезы и зубчатого колеса;

φ_i, φ_{i+1} – профильные углы режущих кромок i-го и i+1-го зубьев фрезы в плоскости передней поверхности;

S_o – подача фрезы на оборот;

z_o – количество профилирующих зубьев огибающей дисковой фрезы;

b_i и b_{i+1} – расстояние между линией межосевого перпендикуляра фрезы и зубчатого колеса и действительной осью гиперболоида вращения, образованного режущей кромкой соответственно i и i+1 зуба фрезы.

Уравнение линии AB пересечения поверхностей 1 и 2 можно найти при совместном решении уравнений (4) и (5).

$$x^2 \cdot tg^2\varphi_i - x^2 \cdot tg^2\varphi_i + 2 \cdot x \cdot S_o \cdot tg^2\varphi_i - S_o^2 \cdot tg^2\varphi_i = 0 \quad (8)$$

$$\text{откуда } x = \frac{S_o}{2} \quad (9)$$

Следовательно, линия пересечения AB лежит в плоскости $x = \frac{S_o}{2}$ и имеет уравнение

$$(a_w - y)^2 \cdot tg^2\varphi_i - (b_i - z)^2 = a^2 \cdot tg^2\varphi_i - \frac{S_o^2}{4} \cdot tg^2\varphi_i \quad (10)$$

Это уравнение гиперболы преобразуем к виду

$$(a_w - y)^2 - \frac{(b_i - z)^2}{tg^2\varphi_i} = a^2 - \frac{S_o^2}{4} \quad (11)$$

и найдем координаты точки A пересечения линии AB с поверхностью 3. Для этого решим совместно уравнения (6) и (10).

При $x = \frac{S_o}{2}$ они имеют вид

$$(a_w - y)^2 - \frac{(b_i - z)^2}{tg^2\varphi_i} = a^2 - \frac{S_o^2}{4} \quad (12)$$

$$(a_w - y)^2 - \frac{(b_{i+1} - z)^2}{tg^2\varphi_{i+1}} = a^2 - \frac{S_o^2}{4} \cdot \left(\frac{z_o - 2}{z_o}\right)^2 \quad (13)$$

После вычитания уравнения (12) из уравнения (13)

$$\frac{(b_{i+1} - z)^2}{tg^2\varphi_{i+1}} - \frac{(b_i - z)^2}{tg^2\varphi_i} + \frac{S_o^2}{4} - \frac{S_o^2}{4} \cdot \left(\frac{z_o - 2}{z_o}\right)^2 = 0 \quad (14)$$

и преобразований получаем квадратное уравнение

$$\frac{(b_{i+1} - z)^2}{tg^2\varphi_{i+1}} - \frac{(b_i - z)^2}{tg^2\varphi_i} + S_o^2 \cdot \frac{z_o - 1}{z_o^2} = 0 \quad (15)$$

Решаем квадратное уравнение (15) относительно координаты z для точки A

$$z_A = \frac{b_{i+1} \cdot tg^2\varphi_i - b_i \cdot tg^2\varphi_{i+1} \pm tg\varphi_i \cdot tg\varphi_{i+1} \cdot \sqrt{(b_i - b_{i+1})^2 - \left(\frac{S_o}{z_o}\right)^2 \cdot (z_o - 1) \cdot (tg^2\varphi_i - tg^2\varphi_{i+1})}}{tg^2\varphi_i - tg^2\varphi_{i+1}} \quad (16)$$

Координату y для точки A найдем из уравнения (12)

$$y_A = a_w - \frac{\sqrt{(b_i - z_A)^2 + \left(a^2 - \frac{S_o^2}{4}\right) \cdot tg^2\varphi_i}}{tg\varphi_i} \quad (17)$$

Координата x для точки A $x_A = \frac{S_o}{2}$

Аналогично определяются координаты точки C пересечения поверхностей 2, 3 и 4.

$$z_C = \frac{b_{i+1} \cdot tg^2\varphi_i - b_i \cdot tg^2\varphi_{i+1} \pm tg\varphi_i \cdot tg\varphi_{i+1} \cdot \sqrt{(b_i - b_{i+1})^2 + \left(\frac{S_o}{z_o}\right)^2 \cdot (z_o - 1) \cdot (tg^2\varphi_i - tg^2\varphi_{i+1})}}{tg^2\varphi_i - tg^2\varphi_{i+1}} \quad (18)$$

$$y_C = a_w - \frac{\sqrt{(b_{i+1} - z_C)^2 + \left(a^2 - \frac{S_o^2}{4}\right) \cdot tg^2\varphi_{i+1}}}{tg\varphi_{i+1}} \quad (19)$$

$$x_C = \frac{S_o}{2} \cdot \frac{z_o + 2}{z_o} \quad (20)$$

С использованием полученных зависимостей можно определить отклонения реальной поверхности зуба колеса от номинальной эвольвентной поверхности в любой её точке, в том числе и максимальные отклонения, которые имеют место в точках пересечения соседних поверхностей резания. Например, для точки A эта составляющая определяется из зависимости

$$h_1 = \sqrt{z_A^2 + y_A^2 - r_b^2} - r_b \cdot \nu_A, \quad (21)$$

где ν_A – угол развернутости эвольвенты в точке A пересечения поверхностей резания; r_b – радиус основной окружности зубчатого колеса

$$\nu_A = arctg\frac{z_A}{y_A} + arctg\frac{\sqrt{z_A^2 + y_A^2 - r_b^2}}{r_b} - \eta_b, \quad (22)$$

где η_b – центральный угол зубчатого колеса, определяющий положение точки начала эвольвентной кривой на основной окружности.

Расчеты с использованием приведенных зависимостей позволили установить:

– при равномерном законе изменения профильных углов расположения режущих кромок от зуба к зубу фрезы (равномерной конструктивной подаче) погрешность формообразования h_1 изменяется по высоте зуба колеса, монотонно увеличиваясь от ножки к головке зуба. Это обусловлено свойствами эвольвентной кривой;

– возможность управления погрешностью формообразования по высоте зуба колеса за счет изменения закона конструктивной подачи.

Для определения закона изменения конструктивной подачи, обеспечивающего минимизацию и выравнивание погрешности формообразования эвольвентной поверхности зуба колеса при огибающем зубофрезеровании дисковой фрезой разработан алгоритм, представленный на рисунке 2.

Входными данными алгоритма (блок 2) являются:

– параметры зубчатого колеса (m – модуль, z_1 – число зубьев, α – угол профиля исходного контура, r_{a1} и r_{f1} – соответственно радиусы окружности выступов и впадин, x – коэффициент смещения исходного контура);

– параметры дисковой огибающей фрезы (z_o – число зубьев, R_{ao} – наружный радиус, γ_o – передний угол на наружном диаметре зуба, N – количество рядов зубьев);

– параметр режима резания (S_o – подача на оборот фрезы).

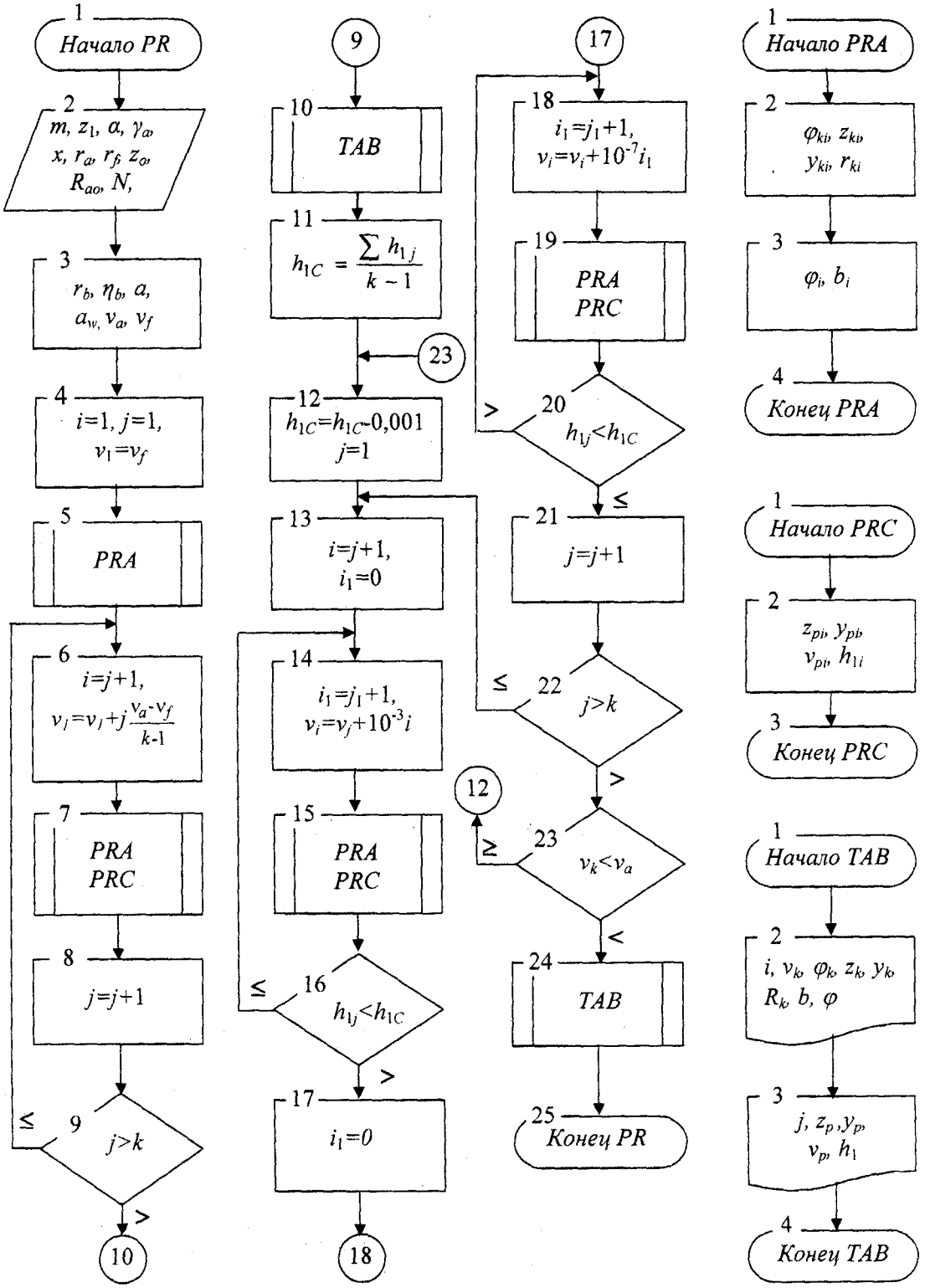


Рисунок 2 – Алгоритм минимизации погрешности формообразования эвольвентной поверхности зуба колеса при огибающем зубофрезеровании

В соответствии с алгоритмом в блоках 3 – 5 выполняется расчет постоянных параметров, необходимых для дальнейших расчетов (r_b – радиус основной окружности колеса; η_b – центральный угол зубчатого колеса, определяющий положение точки начала эвольвенты на основной окружности; a – смещение режущих кромок зубьев фрезы относительно её осевой плоскости; a_w – расстояние между осями фрезы и зубчатого колеса; v_a и v_f –углы развернутости эвольвенты соответственно на окружности выступов и впадин зубчатого колеса).

В блоках 6 – 9 организуется цикл расчета погрешности формообразования h_1 в различных точках реальной поверхности по высоте зуба колеса для условия равномерного изменения профильных углов режущих кромок от зуба к зубу фрезы. Для расчета используются подпрограммы *PRA* и *PRC*. По результатам расчета в блоке 11 находится средняя величина погрешности формообразования h_{1C} для условия равномерного изменения профильных углов режущих кромок зубьев фрезы.

За точку отсчета последующих вычислений принимается положение первого зуба фрезы, формирующего нижнюю точку эвольвентного профиля зуба колеса. В блоках 13 – 20 организуются циклы расчетов на основе использования метода последовательных итераций, определяющих положение каждого последующего зуба (его профильный угол), обеспечивающего среднюю величину погрешности формообразования h_{1C}. Для сокращения количества расчетов вначале используется грубое изменение профильных углов зубьев (блоки 13 – 16), а затем тонкое изменение (блоки 17 – 20).

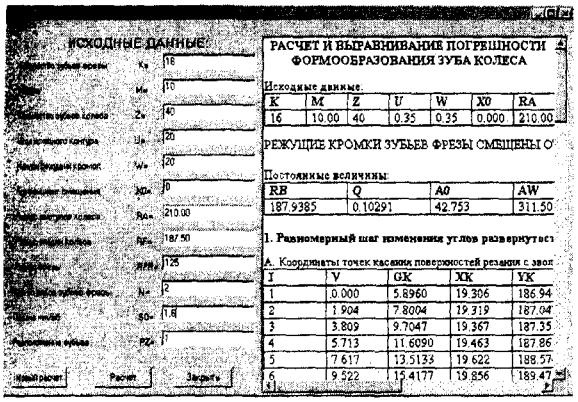
В результате расчетов может создаться положение, когда для последнего зуба фрезы с наибольшим углом профиля условие блока 23 не соблюдается. В этом случае выполняется следующий цикл вычислений при новом среднем значении h_{1C}, которое определяется в блоке 12 и учитывает полученное неудовлетворительное значение. Количество циклов таких вычислений определяется требуемой точностью расчета величины конструктивной подачи.

Для вывода на печать результатов расчета используется подпрограмма *TAB*, которая формирует блок выходных данных: координаты и углы развернутости эвольвенты в точках касания с ней каждого зуба фрезы z_k, y_k, v_k, R_k; профильные углы зубьев дисковой огибающей фрезы φ_i в плоскости передней поверхности; высоту погрешности формообразования h_1 зуба колеса; величину конструктивной подачи режущих кромок зубьев огибающей дисковой фрезы, которая выражается в изменении профильных углов между соседними зубьями.

На основе представленного алгоритма в среде Delphi разработан пакет программ автоматизированного расчета для персонального компьютера (рисунок 3), позволяющий определить конструктивные и геометрические параметры дисковых огибающих фрез для нарезания цилиндрических прямозубых колес с различными параметрами.

С использованием программ исследовано влияние количества профилирующих зубьев дисковой огибающей фрезы – z_o, отрицательного переднего угла на наружном диаметре – γ_a, определяющего смещение режущих кромок относительно осевой плоскости и подачи на оборот фрезы – S_o на величину погрешности формообразования h_1. Результаты расчетов при равномерном изменении профильных углов зубьев фрезы (кривая 1) и минимизированной величине погрешности формообразования h_1 (кривая 2) представлены на рисунках 4 – 6. Исходными данными для расчетов являлись: m = 10 мм; z_1 = 40; $\alpha = 20^0$; N = 2; r_a= 210 мм; r_f = 187,5 мм; R_ϕ = 125 мм.

Влияние числа зубьев колеса z_1 и модуля m на величину погрешности формообразования h_1 представлено на рисунке 7.



исунок 3 – Интерфейс программы автоматизированного расчета дисковых огибающих фрез

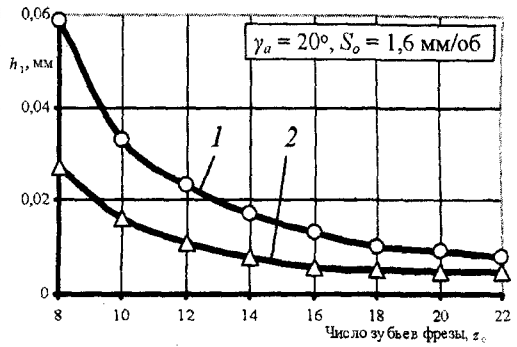


Рисунок 4 – Влияние числа зубьев фрезы на погрешность формообразования h_1

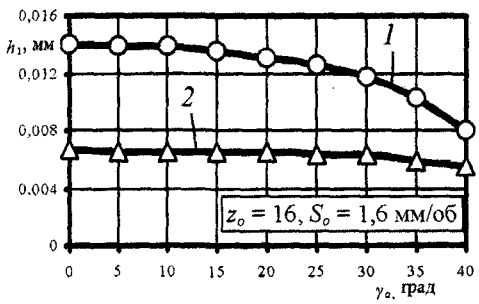


Рисунок 5 – Влияние переднего угла γ_a на погрешность формообразования h_1

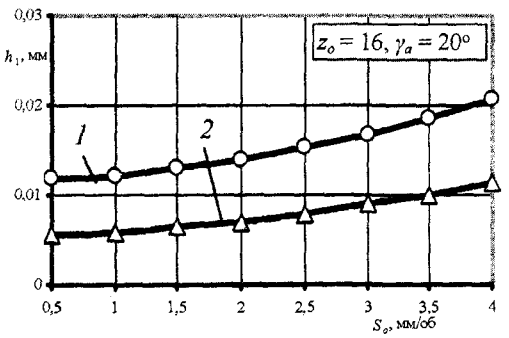


Рисунок 6 – Влияние подачи фрезы на погрешность формообразования h_1

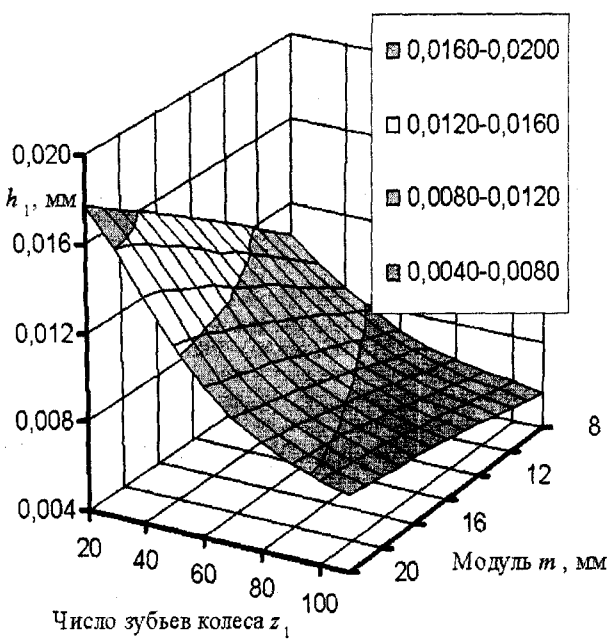


Рисунок 7 – Влияние параметров зубчатого колеса на погрешность формообразования h_1

ВЫВОД

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением числа профилирующих зубьев дисковой огибающей фрезы величина погрешности формообразования h_1 уменьшается. Причем, начиная с $z_0 = 16$ это уменьшение незначительно. Поэтому можно рекомендовать дисковые огибающие фрезы изготавливать с 16 профилирующими зубьями.

С увеличением отрицательного переднего угла на наружном диаметре – γ_a, определяющем смещение режущих кромок относительно осевой плоскости фрезы, величина минимизированной погрешности формообразования h_1 уменьшается незначительно. Поэтому для дисковых огибающих фрез следует выбирать угол γ_a из условия обеспечения требуемого заднего угла на режущем лезвии.

С увеличением модуля и уменьшением числа зубьев нарезаемого колеса величина погрешности формообразования h_1 возрастает.

Влияние подачи дисковой огибающей фрезы на величину погрешности формообразования h_1 выражается практически пропорциональной зависимостью. Поэтому величину подачи рекомендуется назначать, исходя из требуемой точности нарезаемого колеса и производительности обработки.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Калашников, А.С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А.С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

2.Сотников, В.И. Нарезание цилиндрических зубчатых колес дисковыми огибающими зуборезными фрезами [Текст] / В.И. Сотников, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 128 с.

3. Коганов, И.А. Чистовое зубопротягивание цилиндрических зубчатых колес по методу бесцентроидного огибания [Текст] / И.А. Коганов, В.Д. Артамонов, Г.В. Малахов // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. – Тула, ТПИ, 1986. - С. 179-183.

4.Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами [Текст] / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. – Курск: КурскГТУ, 1997. – 391 с.

5.Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

Владимир Ильич Сотников
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Государственный университет-
учебно-научно-производственный комплекс»
Тел. (4862) 54-14-19
E-mail: vis.asis17@gmail.com

V.I. SOTNIKOV

ALGORITHM FOR MINIMIZING THE INACCURACY SHAPING INVOLUTE SURFACE IN ENVELOPE GEAR MILLING

This article discusses an algorithm for calculating and minimizing the inaccuracy shaping evolution of the surface of the teeth ventnoy spur wheels with disc envelopes gear milling. The results of calculations using the algorithm and presents practical recommendations.

Keywords: *algorithm, the inaccuracy shaping; involute surface; envelope gear milling.*

BIBLIOGRAPHY

[1]Kalashnikov, A.S. The technology of manufacture of gears [Text] / A.S. Kalashnikov. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 480 p.

[2]Sotnikov, V.I. Cutting cylindrical gears disc envelopes gear cutting mills [Text] / V.I. Sotnikov, A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov. – M.: Mashinostroenie-1, 2005. – 128 p.

[3]Koganov, I.A. Finish zuboprotyagivanie cylindrical gears according to the method an invaluable troidnogo rounding [Text] / I.A. Koganov, V.D. Artamonov, G.V. Malakhov // Automatic manipulation and metalworking equipment with program control. – Tula, TPI, - 1986. - Pp. 179-183.

[4]Lashnev, S.I. Geometric theory of the formation of surface cutting tools [Text] / S.I. Lashnev, A.N. Borisov, S.G. Emelyanov. – Kursk: KurskGTU, 1997. – 391 p.

[5]Suslov, A.G. The quality of the surface layer of machine parts [Text] / A.G. Suslov. - M.: Mashinostroenie, 2000. – 320 p.

Vladimir Ilyich Sotnikov
Ph.D., Associate Professor
FGBOU VPO "State University-
educational and scientific-industrial complex "
Tel. (4862) 54-14-19
E-mail: vis.asis17 @ gmail.com

УДК 621.9

Ю.С. СТЕПАНОВ, Г.В. БАРСУКОВ, А.В. МИХЕЕВ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ ФОРМУ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПРЕГРАДЫ

В статье проведен анализ схем разрушения поверхности преграды при воздействии сверхзвуковой двухфазной струи, позволяющий подойти к созданию модели для прогнозирования точности детали после гидроабразивного резания.

Ключевые слова: *гидроабразивное резание, абразив, разрушение, проникание, микроцарапины*

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения требуемой точности гидроабразивного резания деталей сложного контура, возникает необходимость регулирования во время обработки давления истечения, скорости подачи сопла, расстояния между соплом и материалом. непостоянство режимов резания приводит к возникновению погрешности формы поверхности реза: конусности с большим или меньшим основанием вверху и бочкообразности, что вызывает необходимость провести анализ влияния параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

M. Hashish [1] один из первых выполнил анализ макроскопических особенностей процесса разрушения преграды сверхзвуковым потоком абразивных частиц основанный на данных высокоскоростной съемки процесса разрушения в прозрачных материалах (плексиглас). По результатам исследования он предлагает двумерную модель разрушения в направлении движения потока (рисунок 1).

M. Hashish в направлении движения сверхзвукового потока выделяет последовательность трех каскадов разрушения: входного, основного режущего и выходного. Во входном каскаде поток абразивных частиц врезается в материал преграды, а глубина реза постепенно возрастает. При достижении максимально возможной глубины разрушения на дне образуются ступенчатая поверхность. Это второй каскад – основного разрушения. В конце движения вдоль преграды на глубине h_0, поток отражается в обратном направлении от направления

движения, что приводит к образованию на дне треугольника, показанного на рисунке 1. Это третий каскад - выходной.

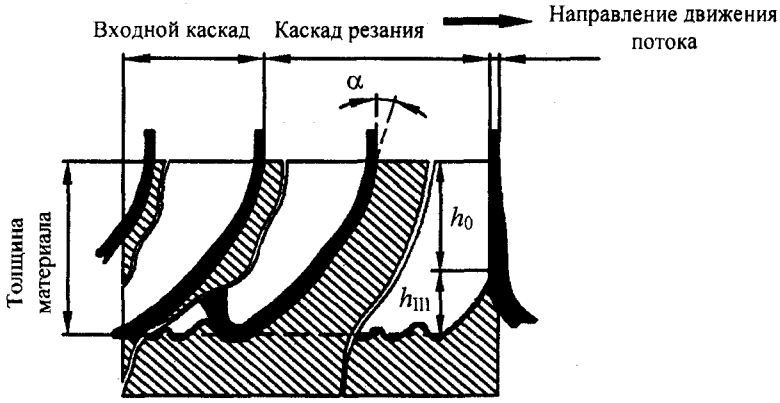


Рисунок 1 - Схема разрушения преграды в направлении движения сверхзвукового потока абразивных частиц

R. Kovacevic [1] установил, используя инфракрасную термографию, что нагрев вокруг этого треугольника возрастает, что указывает на кумулятивный процесс теплообразования.

R. Mohan, R. Kovacevic [1] зафиксировали концентрацию сигналов акустической эмиссии во входном и выходном каскаде, что указывает на изменение гидродинамических явления в этой области, типа турбулентности и кавитации.

По глубине разрушения механизм разделяется также на различные стадии. Так M. Hashish применяет концепцию эрозии твердого материала и выделяет по глубине на две ступени разрушения.

Первая ступень это зона интенсивного износа h_0 (рисунок 1). M. Hashish установил, что на этой ступени съем материала осуществляется единичными абразивными частицами при малых углах столкновения, что характерно для процесса микрорезания.

При достижении некоторого угла столкновения режим резания переходит во вторую ступень h_{III} - износ. На этой ступени материал преграды удаляется под воздействием различных видов эрозии, которая связана с многоходовой бомбардировкой частицами, повышением твердости поверхности из-за пластической деформации и формированием трещин. Эта зона характеризуется образованием на поверхности разрушения штрихов обработки и волнистости. При достижении критической глубины проникания процесс разрушения прекращается, а абразивные частицы движутся на дне под углом $\varphi \cong 90°$.

Однако, M. Hashish не дает теоретических объяснений явлению существования двух ступеней разрушения материала преграды. Также нет никакого экспериментального доказательства для случая резания пластичных и хрупких материалов.

Для исследования фронта разрушения Blickwedel исследовал механизм разрушения преграды при различных режимах истечения сверхзвукового потока абразивных частиц, развивая двухступенчатую модель M. Hashish. Используя скоростную съемку, Blickwedel, зафиксировал на фронте разрушения несколько ступеней. Он отмечает начало формирования первой ступени (начало «зоны деформационного износа») на глубине 30 - 40 % от максимальной глубины проникания. Позже, Ohisson, так же установил явление многоступенчатого формирования фронта разрушения. Основываясь на измерениях силы резания, Ohisson, разработал феноменологическую модель формирования штрихов на поверхности преграды, основанную на изменении геометрии фронта разрушения.

J. Zeng [1] развиватт концепцию модели M. Hashish. На первой ступени процесса разрушения, названной «зоной прямого воздействия», абразивные частицы прямо влияют на всю ширину разрушения. Наиболее важным выводом в модели J. Zeng является то, что при

цесс разрушения связан с углом падения абразивной частицы, превышение которого останавливает процесс разрушения.

D. Arola и M. Ramulu [1] разработали трехступенчатую модель разрушения преграды (рисунок 2). Они вводят понятие о «максимальной входной зоне» или «зоне повреждения», которая характеризуется пластической деформацией под почти перпендикулярным действием абразивных частиц. Ими выделены следующие характерные зоны в процессе проникновения сверхзвукового потока абразивных частиц в преграду - «зона чистового резания» и «зона чернового резания». Эти термины указывают, что строение поверхности реза изменяется с ростом глубины проникания.

D. Arola и M. Ramulu установили, что интенсивность разрушения материала замедляется с ростом глубины резания. Это связано со значительными энергетическими потерями на начальное проникание потока абразивных частиц в преграду. При резании хрупких материалов это ведет к снижению процесса зарождения трещин в глубинной области. Снижение кинетической энергии абразивных частиц при резании пластичных материалов приводит к накоплению энергии на некоторой критической глубине.

Гидродинамические характеристики сверхзвукового потока свободных абразивных частиц и кинематические условия взаимодействия с поверхностью преграды определяют геометрическую форму поверхности при сквозном разрушении (рисунок 3).

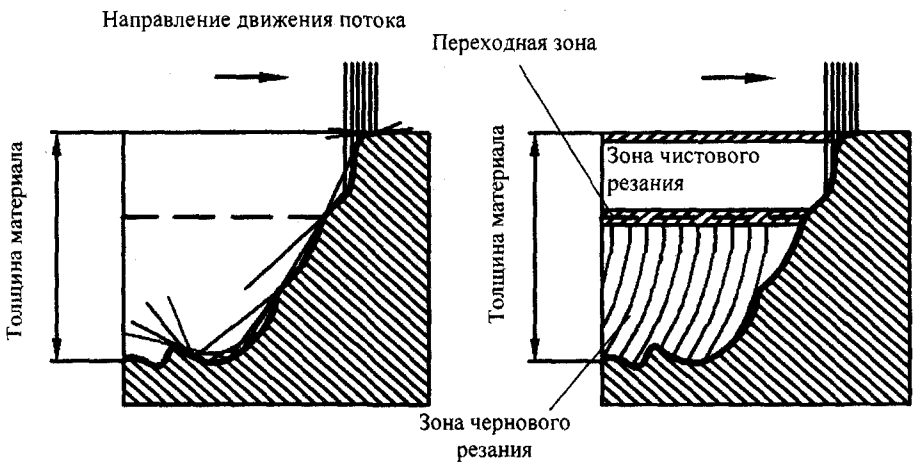


Рисунок 2 - Схема перемещения фронта разрушения преграды

Конусность поверхности разрушения с большим основанием вверху формируется с ростом толщины и твердости материала. Аналогичная конусность возникает при увеличении расстояния от сопла до материала, что приводит к расширению струи до поверхности материала [2]. Поэтому по сечению струи плотность абразивного потока уменьшается, а, следовательно, уменьшается и количество режущих частиц воздействующих на единичную площадку области разрушения.

Плотность абразивного потока в периферийной зоне наиболее низкая. Поэтому интенсивность разрушения материала в периферийной зоне разрушения значительно ниже, и в ряде случаев не может обеспечить сквозное разрушение. Тогда как центральная область струйного потока, с большим количеством режущих частиц, способна произвести сквозное разрушение преграды за тот же период времени воздействия. Если угол раскрытия струйного потока при выходе из сопла значителен, то абразивная частица сталкивается с преградой под большим углом, что приводит к росту толщины и снижению длины оставленного на поверхности следа h_i (рисунок 4).

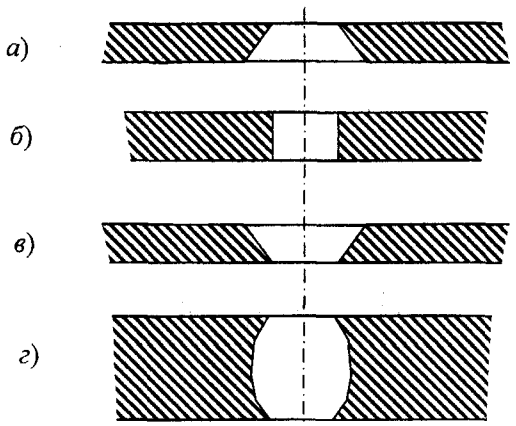


Рисунок 3 - Геометрия поверхности разрушения преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц:
а – конусность с большим основанием внизу; б – прямолинейность; в – конусность с меньшим основанием внизу; г - бочкообразность

Поэтому форма поверхности разрушения главным образом зависит от энергетических характеристик абразивных частиц (концентрация, направление движения, скорость и др.) в периферийной зоне.

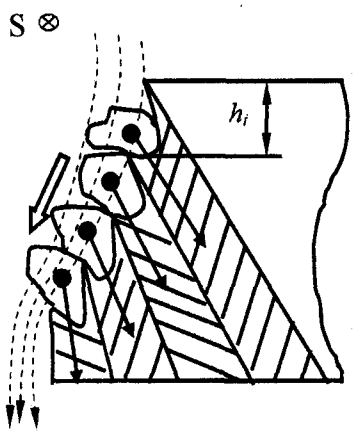


Рисунок 4 - Схема формирования поверхности разрушения периферийной областью сверхзвукового потока свободных абразивных частиц

В радиальном направлении к направлению движения сверхзвукового потока фронт разрушения представляет собой некоторую кривую, форма которой зависит от распределения скоростей в потоке и количества режущих частиц.

Форма, длина и толщина снимаемой стружки зависит от распределения скоростей в сверхзвуковом потоке [3]. Периферийная частица, вектор скорости, которого направлен под некоторым углом в глубь материала, находится в худших условиях, так как возрастает толщина снимаемой стружки, а как только процесс проникания остановиться, водяной поток унесет ее из зоны резания. Это замечание представляет интерес, потому что, как только центр ядра струи прорежет преграду, поток рабочей жидкости в периферийной зоне изменит направление движения в сторону образовавшейся воронки, а это в свою очередь способствует сокращению времени взаимодействия периферийной частицы с преградой. Кроме того, по мере врезания в преграду на частицу в периферийной зоне оказывается воздействие еще большего объема рабочей жидкости.

В зависимости от количества абразивных частиц, действующих на единичную площадку (прежде всего в периферийной области), формируется окончательный вид профиля разрушения. Количество контактных взаимодействий абразива с преградой в единицу времени зависит от направления движения потока, так как режущие возможности сверхзвукового потока абразивных частиц уменьшаются от лобовой точки к периферии.

Рассмотрим схему снятия объема материала единичной частицей. Частица врезается в материал под некоторым углом. На нее действуют силы сопротивления со стороны преграды. Однако скорость частицы настолько велика, что при контакте с материалом она способна либо пластически деформировать материал преграды на глубину t, либо вырезать часть материала. Это характерно малым углам атаки.

Постепенно, теряя скорость и силу воздействия, абразивная частица из-за возрастающих сил сопротивления материала преграды по мере внедрения и воздействия водяного потока изменит направление движения, что объясняет формирование плавного выхода зерна из материала (рисунок 5, *а*).

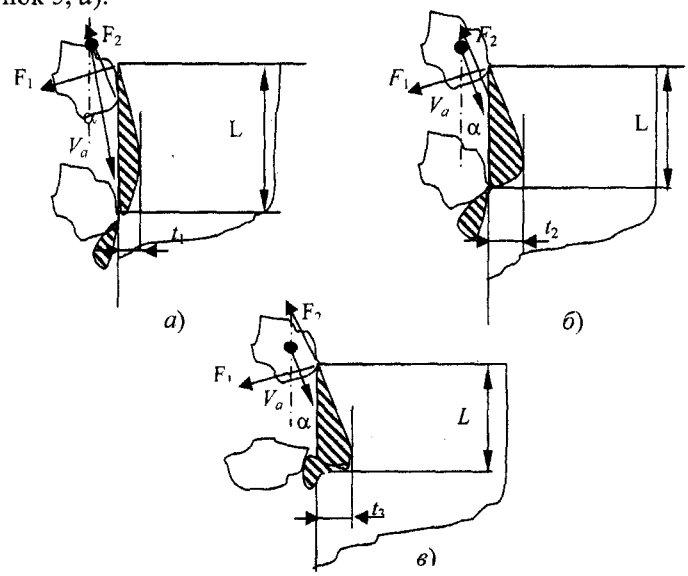


Рисунок 5 - Схема снятия объема материала преграды единичной абразивной частицей

При росте глубины врезания частицы в материал преграды t_2, длина оставленного следа L_2 уменьшается, а выход частицы из контакта с материалом более крутой (рисунок 5, *б*). В случае если сила взаимодействия предельна на глубине врезания t_3, частица теряет энергию и уносится потоком жидкости, без плавного выхода из материала преграды (рисунок 5, *в*). Этим можно объяснить навалы в конце поверхности разрушения единичной частицей.

Так как контакт частицы с поверхностью материалы преграды мгновенный, то в дальнейшем будем считать, что оно неподвижно относительно своих осей.

Конусообразность с большим основанием внизу формируется при снижении толщины или твердости материала преграды и увеличении давления истечения сверхзвукового потока. Поток расширяется в материале, т.к. плотность и скорость абразивных частиц в периферийной зоне достаточно велика для осуществления резания по расширяющейся траектории.

Следует отметить, что в процессе формирования такого профиля участвуют не только периферийные частицы, но и частицы всего потока. Следы от частиц накладываются друг на друга, формируя микрогеометрию поверхностного слоя.

Процесс разрушения можно условно представить в виде последовательности зон срезаемого припуска частицами, расположенными на разных расстояниях от оси струйного потока. Конечно, в процессе таких последовательных зон срезаемого припуска не существует,

вследствие хаотичного расположения абразивных частиц, но такое допущение, позволяет провести анализ механизма формирования геометрии поверхности разрушения.

Итак, процесс разрушения в периферийной зоне I будет возможен, когда произойдет разрушение материала преграды в прилегающей зоне II (рисунок 6). Аналогично процесс протекает и для других соседних слоев. Так резание в зоне II прекращается при достижении какой-то критической толщины и возобновится, когда срежется зона III и т. д.

Если количество режущих абразивных частиц и их кинетическая энергия достаточна для осуществления сквозного резания в зоне I, формируется трапециевидный профиль с большим основанием внизу. Поверхность разрушения может быть, как полностью чистовая с регулярным микрорельефом, так в сочетании с грубой зоной с характерными штрихами обработки. Протяженность чистовой и грубой зоны зависит от режимов взаимодействия и физико-механических свойств материала преграды.

Поэтому грубая зона на поверхности разрушения формируется, когда большая часть активных режущих абразивных частиц в зоне I на глубине h_i не может произвести работу резания. На потерявшие скорость частицы набегают с другие и сообщают им дополнительную кинетическую энергию. При этом не только уменьшается количество резов на единичной площадке, но и увеличивается ширина следа оставляемого группой абразивных частиц, что приводит к появлению глубоких штрихов на поверхности разрушения.

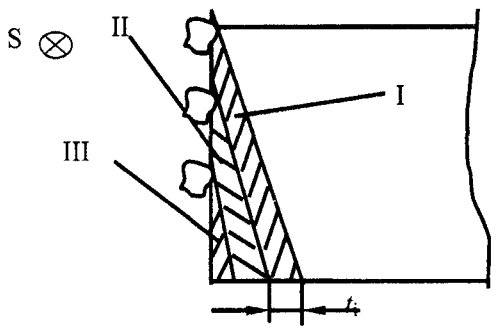


Рисунок 6 - Схема разбиения зоны разрушения преграды

Высота микронеровностей поверхности с расходящейся конусностью будет выше, чем при прямолинейном резе. Так как хотя кинетическая энергия периферийных зерен достаточна для резания материала, но их количество недостаточно для формирования микрорельефа с низкими высотными характеристиками.

При сквозном разрушении хрупкого материала преграды на выходе потока будет наблюдаться отрыв части материала, вследствие развития трещин в утонченной зоне под действием набегающего потока (рисунок 7).

Рассмотрим формирование конусности поверхности реза с большим основанием вверху. Абразивные частица в зоне I в единицу времени способны внедриться в материал на глубину h_1, в зоне II – на глубину h_2, в зоне III – на глубину h_3 и т.д. При этом $h_1 < h_2 < h_3 < ... < h_i$. Глубина проникновения частиц в материал h_i зависит не только от их кинетической энергии, сопротивления материала преграды, но и от количества единичных контактов. Формируется ступенчатая поверхность с уменьшением ширины реза (рисунок 8).

На угол уклона профиля главным образом влияет величина площадки ti. Чем она больше, тем больше уклон. Размеры этой площадки зависят от распределения частиц по сечению струи.

Если периферийная зона имеет большую ширину, то в процессе разрушения материала на глубину h1 участвуют не только периферийные частицы, но и другие, расположенные рядом, способные разрушить материал преграды примерно на эту же глубину. В результате образуется профиль с большим углом уклона поверхности разрушения.

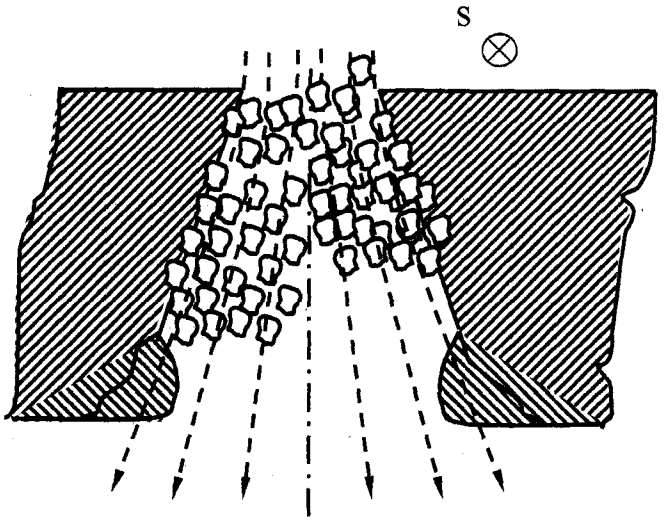


Рисунок 7 - Схема срыва утонченной зоны материала преграды

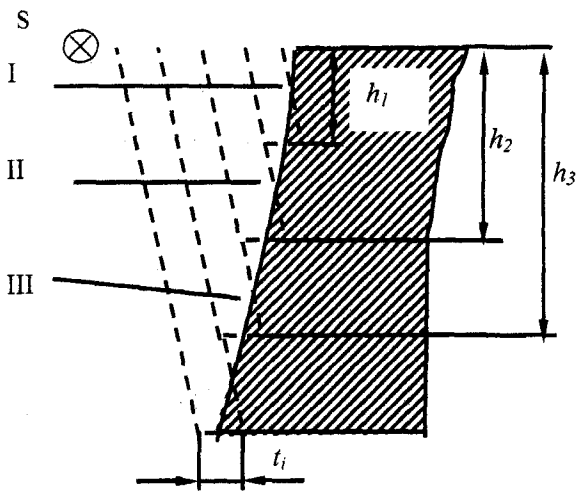


Рисунок 8 - Схема формирования конического профиля разрушения преграды с большим основанием вверху

Выделение площадки t определенной ширины позволяет рассмотреть формирование прямолинейного и бочкообразного профиля поверхности разрушения.

Получение прямолинейного профиля поверхности разрушения возможно, когда ядро струи приблизительно равно диаметру потока, а ее скорость по глубине резко не убывает. Тогда, формирование прямолинейного профиля можно представить в виде ступенек с малыми площадками t, размеры которых значительно не влияют на величину отклонения профиля от прямолинейности (рисунок 9).

При этом длина следа от единичного зерна h значительно больше величины врезания t.

При значительной толщине преграды энергетические характеристики периферийной области ядра потока резко падают по мере роста глубины проникновения h_i. Это приводит к увеличению в периферийной зоне площадки t и уменьшению глубины врезания зерен h. В результате формируется поверхность разрушения с двумя зонами: прямолинейной I (гладкая зона) и конусной II (грубая зона) (рисунок 10).

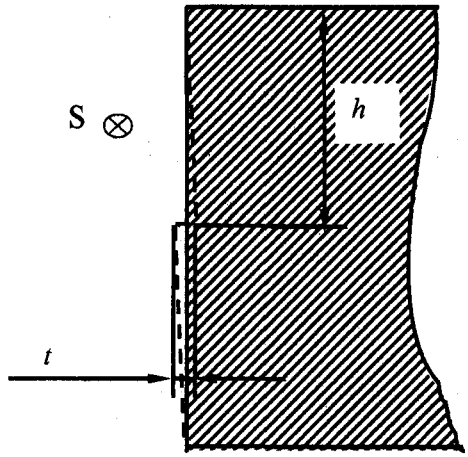


Рисунок 9 - Схема формирования прямолинейного профиля поверхности разрушения преграды

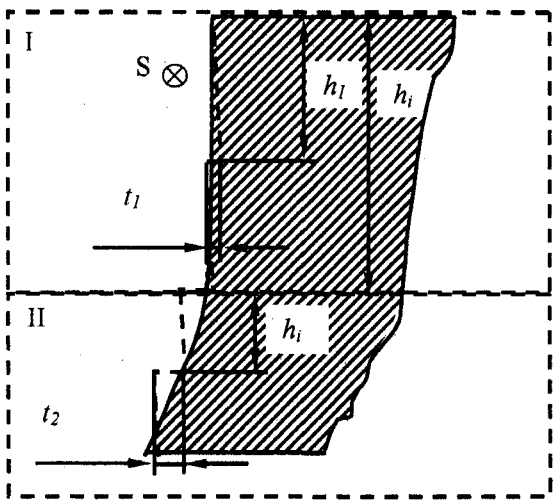


Рисунок 10 - Схема формирования сложного профиля поверхности разрушения преграды

Бочкообразность поверхности реза формируется при большой толщине и высоких энергетических характеристиках потока. При этом будет наблюдаться зона расширения, где поток расширяется, и зона сужения. Можно выделить три вида бочкообразности: с точкой входа и выхода лежащими на прямой параллельной оси потока (рисунок 11, *а*) или по разные стороны от нее (рисунок 11, *б*, *в*).

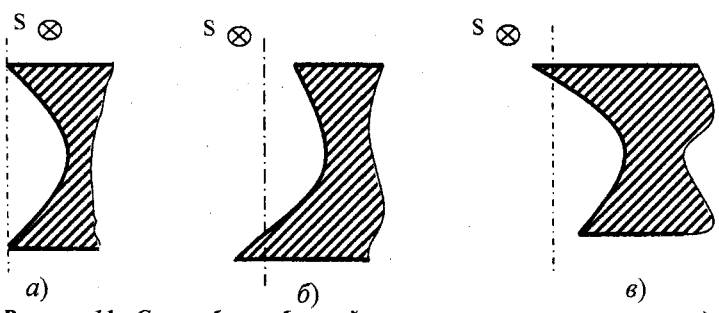


Рисунок 11 - Схемы бочкообразной поверхности разрушения преграды

Рассмотрим процесс формирования бочкообразного профиля. Бочкообразный профиль, представленный на рисунок 11, *б*, формируется, когда режущие возможности струи по мере проникновения в материал резко падают практически по всему сечению струи. В этом случае, только ядро струи малого диаметра осуществляет сквозное резание.

Рассмотрим случай, если в зоне I абразивные частицы имеют достаточную энергию для осуществления микрорезания на глубину h_1. Обладая большей кинетической энергией и количеством режущих частиц, рядом расположенные частицы в зонах II, III, …, N проникают в материал преграды на глубину h_2 ($h_1 < h_2$). На глубине h_i режущие возможности периферийной области потока снижаются (рисунок 12). Исходя из того, что количество взаимодействий на единичной площадке зависит от направления движения потока вдоль преграды, абразивные частицы, расположенные ближе к оси струи, за отрезок времени способны разрушить материал на несколько большую глубину, но без сквозного разрушения.

Если процесс разрушения преграды движущимся сверхзвуковым потоком абразивных частиц начинается от края преграды, то основной вид разрушения микрорезание. Если разрушение начинается из точки на поверхности преграды, то процесс разрушения сопровождается деформационным и эрозионным износом. При этом диаметр отверстия будет больше ширины разрушения при движении абразивного потока, что связано с ростом количества взаимодействий частиц с материалом преграды в периферийной зоне.

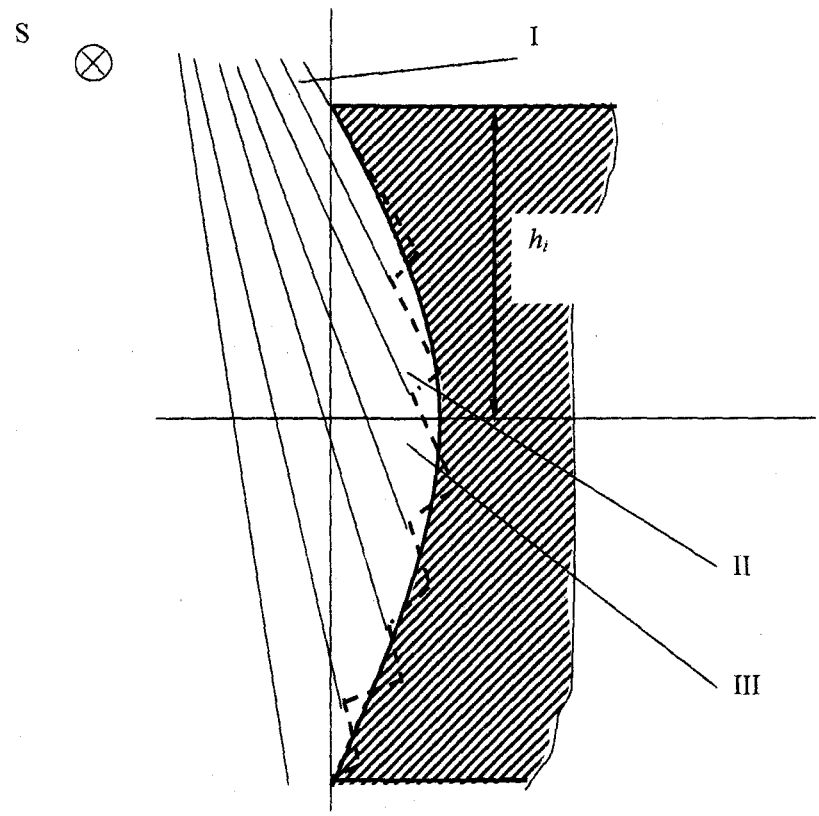


Рисунок 12 - Схема формирования бочкообразной поверхности разрушения преграды с точками входа и выхода сверхзвукового абразивного потока на одной вертикальной линии

ВЫВОД

Приведенный краткий анализ позволяет обосновать следующие допущения, составляющие сущность геометрической модели процесса разрушения: абразивные частицы сверхзвукового потока, вступающие в контакт с преградой, формируют на ее поверхности риски. Основная часть рисок образуется в результате срезания материала преграды, причем доля

таких рисок увеличивается с ростом скорости сверхзвукового потока, меньшая - в результате пластической деформации без снятия стружки.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining [Text] / A.W. Momber, R. Kovacevic. – Springer, 1998. – 394 p.

2.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.

3.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.

Степанов Юрий Сергеевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел
д.т.н., профессор, Директор НОЦ «ОрелНано»
Тел. (4862) 419818
E-mail: stepanov@ostu.ru

Барсуков Геннадий Валерьевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел
д.т.н., профессор кафедры ТМиКТИ ОрелГТУ
Тел. (4862) 419818
E-mail: awj@list.ru

Михеев Александр Васильевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел
к.т.н., научный сотрудник УНИР
Тел. (4862) 419818

Y.S. STEPANOV, G.V. BARSUKOV, A.V. MIKHEEV

EFFECT OF THE PARAMETERS OF FLOW SUPERSONIC WATERJET JETS TO GEOMETRICAL FORM OF SURFACE DESTRUCTION OF BARRIERS

The article analyzes the patterns of destruction under the influence of the surface barrier of supersonic two-phase jet, which allows to approach the creation of a model to predict the accuracy of the details after the Waterjet cutting.

Keywords: *hydroabrasive cutting, abrasive damage, penetration, microcuttin*

BIBLIOGRAPHY

[1]A. Momber, A.W. Principles of Abrasive Water Jet Machining [Text] / AW Momber, R. Kovacevic. - Springer, 1998. - 394 p.

[2]Barsukov, G.V. Technological support roughness, accuracy of form and arrangement of surfaces after the details of Waterjet Cutting [Text] / G. Barsukov // Handbook. Engineering magazine. - 2005. - № 9. - P. 22 - 26.

[3]Stepanov, Y.S Formation of surface layer quality parts at a supersonic jet cutting fluid [Text] / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov // STIN. - 2003. - № 10. - P. 15 -17.

Yuri Stepanov, S.
PSEI HVT "State University - ESPC", Orel
Ph.D., professor, Director of the SEC "OrelNano"
Tel. (4862) 419818
E-mail: stepanov@ostu.ru

Gennady V. Barsukov
PSEI HVT "State University - ESPC", Orel
Ph.D., professor of TMiKTI OrelSTU
Tel. (4862) 419818
E-mail: awj@list.ru

Alexander Mikheyev
PSEI HVT "State University - ESPC", Orel
Ph.D., Research Associate
Tel. (4862) 419818

УДК 621.91.01

Р.Н. ФОМЕНКО

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ

Исследовано влияние наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Определена зависимость угла наклона условной плоскости сдвига при точении от трибологических характеристик инструмента с покрытием. Приведены результаты по обработке материалов твердосплавным инструментом с различными наноструктурированными покрытиями.

Ключевые слова: *наноструктурированное покрытие, качество поверхностного слоя, коэффициент трения, угол наклона условной плоскости сдвига стружки, оптимальная скорость резания*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на производстве широко применяется режущий инструмент с износостойкими покрытиями, которые значительно повышают его эффективность. Как показали исследования, износостойкие покрытия инструмента благодаря низкому коэффициенту трения, обусловленному более слабыми силами адгезионного схватывания материала покрытия с обрабатываемым, существенно изменяют параметры процесса резания: уменьшают длину контакта стружки с поверхностями инструмента, силу резания, снижается температура резания и деформация срезаемого припуска вследствие повышения угла наклона условной плоскости сдвига стружки. Покрытия изменяют процесс резания, а значит, и влияют на формирование тех или иных параметров качества поверхностного слоя детали.

Имеющаяся теоретико-экспериментальная база [1] позволяет без постановки опытов расчетным методом определять оптимальные режимы резания и различные параметры качества поверхностного слоя детали для инструментов без покрытия. Отсутствие теоретико-экспериментальных зависимостей для определения режимов резания при обработке инструментами с покрытиями часто приводит к снижению эксплуатационных характеристик ответственных деталей газотурбинных двигателей и повышению трудоемкости их изготовления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной целью данной работы является разработка методических подходов для определения технологических условий обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя деталей с учетом применения инструментов с износостойкими покрытиями. Под технологическими условиями понимаются: геометрия режущего инструмента, физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов, СОТС, режимы резания, трибологические свойства износостойких покрытий режущего инструмента и др.

В качестве объекта исследований были выбраны: коррозионно-стойкая сталь ЭК26 (05Х12Н2К3М2АФ), титановый сплав ОТ4 и жаропрочный сплав на никелевой основе ЭИ77ТЮР, которые используются для изготовления ответственных деталей газотурбинных двигателей. Метод обработки – точение резцом. Инструментальные материалы: твердый сплав ВК6Р и ТТ7К12. В качестве исследуемых покрытий, на основе приведенных в литературе рекомендаций, были выбраны композитные наноструктурированные покрытия (Ti;Si)N, (Ti;Si;Al)N, (Ti;Si;Zr)CN, нанесенные ионно-плазменным вакуумно-дуговым методом и покрытия, полученные методом ионной имплантации наночастиц TiB_2, Al_2O_3, Ta_2O_5, ZrB_2 в рабочие поверхности режущего инструмента. Режимы резания и геометрия инструмента соответствовала чистовому этапу обработки точением. Составляющие силы резания *Pz, Py* и *Px* регистрировались универсальным динамометром УДМ – 600. Температура резания определя-

лась на основе термо-ЭДС естественной термопары заготовка-резец, методика подробно изложена в работе [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования по определению обрабатываемости вышеуказанных материалов показали, что покрытия инструмента снижают температуру в зоне резания θ в среднем на 50-70 °С, сила резания *Pz* уменьшается на 10-30 % (рисунок 1).

На основе экспериментально полученных температурно-силовых зависимостей от режимов резания графоаналитическим методом профессора Силина С. С. установлены уравнения обрабатываемости, позволяющие определять оптимальные режимы резания:

$$v_O = \frac{C_O \cdot a}{a_1}\left(\frac{t \cdot S \cdot c\rho \cdot \theta_O}{Pz_{\min}}\right)^n, \qquad (1)$$

где a_1 – толщина среза, м; t, S – соответственно глубина резания и подача, м; a – температуропроводность обрабатываемого материала, м^2/с; cρ – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м^3· с ·град.); θ_O – оптимальная температура пары обрабатываемый и инструментальный материал, °С; n, C_o – коэффициенты, зависящие от свойств обрабатываемого материала.

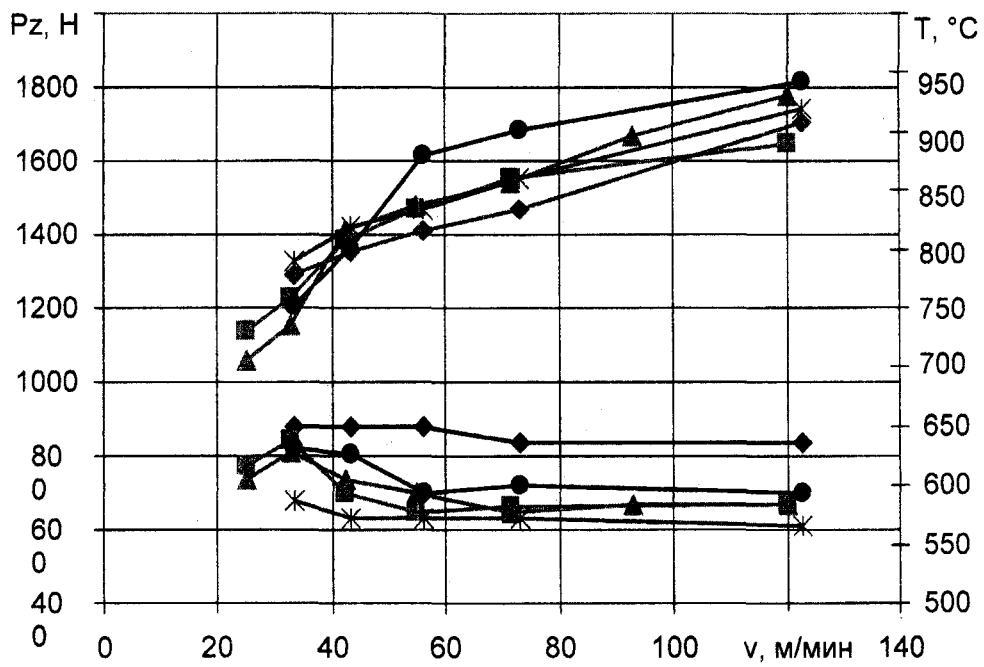


Рисунок 1 - Зависимость силы резания и температуры от режимов обработки и покрытия инструмента; *обрабатываемый материал – коррозионно-стойкая сталь ЭК26 (05Х12Н2М2К3АФ); инструментальный материал – твердый сплав ВК6Р; геометрия инструмента: φ = φ$_1$ = 45°, γ = 8°; α = 7°, r = 1,2 мм; режимы резания: t = 1 мм; S = 0,32 мм/об; наноструктурированные покрытия инструмента:* ВК6Р *(без покрытия);* (TI;Si)N; (TI;Si;Al)N; TiB_2; Al_2O_3

Оптимальная скорость, рассчитываемая по уравнению (1), соответствует стабилизации тангенциальной составляющей силы резания *Pz* и оптимальной температуре резания θ_O.

Пример уравнений обрабатываемости приведен в таблице 1. На основе полученных уравнений обрабатываемости для всех приведенных выше сочетаний инструментальный - обрабатываемый материал – износостойкое покрытие, была разработана программа (рисунок 2), позволяющая с минимальными затратами времени проводить расчеты [3].

Таблица 1 – Уравнения обрабатываемости коррозионно-стойкой стали ЭК26

ЭК26– ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si)N–ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si,Al)N–ВК6Р
$v_O = \frac{1{,}68a}{a_1}\left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0.77} \cdot S_t^{0.72}}\right)^{2{,}5}$	$v_O = \frac{1{,}76a}{a_1}\left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0.685} \cdot S_t^{0.7663}}\right)^{2{,}47}$	$v_O = \frac{2{,}27a}{a_1}\left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0{,}96} \cdot S_t^{0{,}7437}}\right)^{2}$

Оптимальные режимы резания обеспечивают минимальный размерный износ режущего инструмента, а также наилучшие показатели параметров качества поверхностного слоя: минимальная шероховатость поверхности, минимальный уровень и глубина залегания остаточных напряжений и наклепа, благоприятные эксплуатационные свойства детали после обработки – максимальный предел выносливости и контактная жесткость. Однако, на производстве часто требуется назначать режимы резания, отличные от оптимальных, в этих случаях возможность определять параметры качества поверхностного слоя обработанной детали в зависимости от технологических условий обработки, включая трибологические свойства покрытий режущего инструмента, позволяет прогнозировать эксплуатационные свойства деталей.

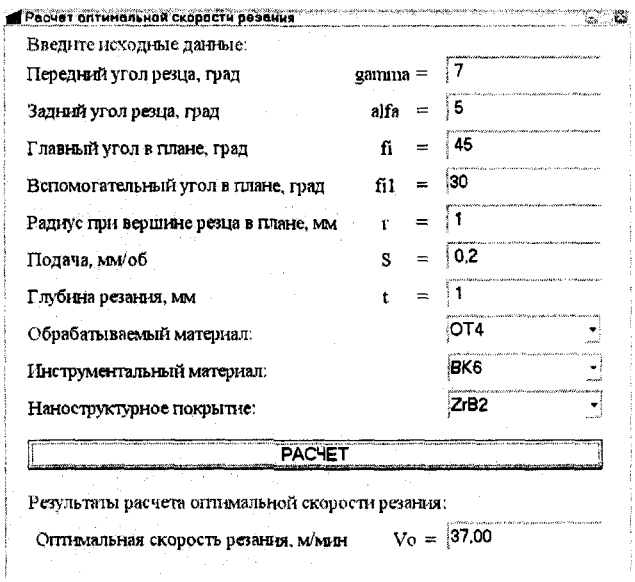


Рисунок 2 - Программа для расчета оптимальной скорости резания

Как показал анализ математических моделей для определения параметров процесса резания и параметров качества поверхностного слоя детали, наиболее важными изменяющимися в зависимости от технологических условий обработки параметрами, входящими в уравнения, являются угол наклона условной плоскости сдвига стружки β_1 и коэффициент трения f_M на поверхностях режущего инструмента. Теоретическое определение указанных величин β_1 и f_M является затруднительным, поэтому для наиболее точных расчетов используют экспериментально-полученные зависимости.

На основе экспериментальных исследований, проведенных в данной работе, определено влияние комплекса технологических условий на величину угла наклона условной плоскости сдвига стружки β_1, которая при использовании инструмента с покрытием увеличивается в среднем на 5-10 % по сравнению с инструментом без покрытия, при прочих равных условиях. Однако математические модели, полученные эмпирическим путем, не являются уни-

версальными и справедливы лишь для ряда исследованных покрытий инструмента. Поэтому для определения величины β_1 с учетом других покрытий режущего инструмента разработана методика, основанная на учете молекулярной составляющей коэффициента трения f_M инструмента с покрытием.

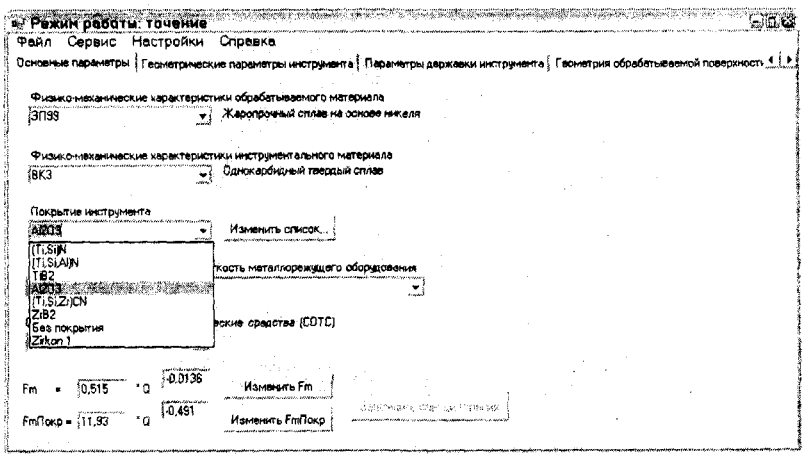


Рисунок 3 - Программа для расчета технологических условий обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя детали с учетом покрытий режущего инструмента

Разработанная методика реализована в виде программы, которая позволяет определять технологические условия обработки, включая: геометрию инструмента, режимы обработки, физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материала, трибологические свойства покрытия инструмента, вид СОТС и т.д., обеспечивающие требуемые параметры качества поверхностного слоя детали – шероховатость поверхности, уровень и глубину залегания остаточных напряжений и наклепа, соответствующие её заданным эксплуатационным свойствам.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ

Для проверки адекватности разработанных математических моделей, построенной на их основе методики и программного обеспечения, было проведено сопоставление расчетных значений параметров качества поверхностного слоя детали, обработанной инструментами с наноструктурными покрытиями, с экспериментальными, полученными при следующих условиях: материал детали – коррозионно-стойкая сталь ЭК26; инструмент – ВК6Р; режим резания: v = 161 м/мин; S = 0,2 мм/об; t = 0,75 мм; геометрия инструмента: $\varphi = \varphi_1 = 45°$, $\gamma = 8°$, $\alpha = 7°$, r = 1,2 мм.

Результаты экспериментов показали, что при использовании инструментов с покрытиями, параметры шероховатости обработанной поверхности, величина остаточных напряжений и глубина наклепа уменьшаются по сравнению с инструментом без покрытия на величину, зависящую от коэффициентов трения. При использовании инструмента с наноструктурными покрытиями значения параметров шероховатости обработанной поверхности ниже, чем в случае использования инструмента без покрытия, применительно к параметрам *Ra* и *Rz* – в среднем на 5 %, что говорит о том, что на величину шероховатости поверхности в первую очередь оказывает влияние геометрия режущего инструмента. Глубина и степень наклепа поверхности, обработанной инструментом с покрытием меньше в среднем на 20 %, по сравнению с инструментом без покрытия (таблица 2). Эпюры тангенциальных остаточных напряжений представлены на рисунок 4.

Для экспериментального определения величины и глубины залегания остаточных напряжений использовался метод послойного электрохимического стравливания. Расчетное

определение параметров шероховатости, глубины наклепа и остаточных напряжений осуществлялось по методике, изложенной в работе [1].

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные значения глубины наклепа h_C и шероховатости обработанной поверхности *Ra*, *Rz*

Покрытие	Расчет	Эксперимент	$\Delta_{отн}$, %	Расчет	Эксперимент	$\Delta_{отн}$, %	Расчет	Эксперимент	$\Delta_{отн}$, %	β_1, °
	Ra, мкм			Rz, мкм			Глубина наклепа h_C, мкм			
ВК6Р (без покрытия)	1,84	1,42	29	8,4	6,8	23	37	50	26	43,5
(Ti;Si)N	1,53	1,35	13	7	6,3	11	34	40	15	45,6
(Ti;Si;Al)N	1,64	1,34	22	7,5	5,8	29	35	40	13	45,3

Использование режущего инструмента с наноструктурированными покрытиями приводит к значительному снижению величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений и глубины их залегания. При обработке инструментом с покрытием в поверхностном слое формируются благоприятные остаточные напряжения сжатия, а общая глубина напряжений снижается на 15-20 %. Расчетные значения остаточных напряжений с достаточной степенью точности коррелируют с экспериментальными.

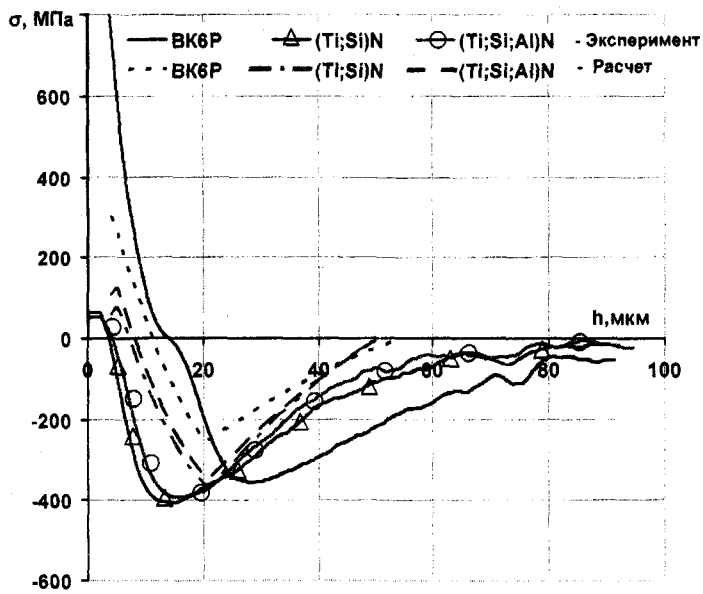


Рисунок 4 - Эпюры тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной детали

ВЫВОДЫ

1. Покрытия режущего инструмента снижают температуру в зоне резания в среднем на 50 С, сила резания *Pz* уменьшается на 10-30 %.

2. На основе взаимосвязи угла наклона условной плоскости сдвига стружки с коэффициентами трения, определяемыми посредством одношарикового трибометра разработана методика учета трибологических свойств различных покрытий инструмента при расчетном определении параметров качества поверхностного слоя детали.

3. Использование режущего инструмента с наноструктурированными покрытиями в значительной степени уменьшает глубину и степень наклепа обработанной поверхности, величину и глубину залегания тангенциальных остаточных напряжений.

Работа выполнена при поддержке Фона содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, контракт № 10001р/17017 и Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и научных школ, грант № МК-1702.2012.8.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Безъязычный, В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В. Ф. Безъязычный, – М.: Машиностроение. – 2012. – 320 с.

2.Безъязычный, В. Ф. Экспресс-метод тарирования термопар [Текст] / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // Справочник. Инженерный журнал. - 2010. – № 7. – С. 38–42.

3.Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613369 «Расчетное определение оптимальных режимов резания при точении инструментами с наноструктурированными покрытиями» [Текст] / Безъязычный В. Ф. (RU), Сутягин А. Н. (RU), Фоменко Р. Н. (RU) // Заявка №2011611697, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.04.2011.

Фоменко Роман Николаевич
Кандидат технических наук, ст. преподаватель
ФГБОУВПО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет» имени П. А. Соловьёва
Тел.: 8(4855) 222-091
E-mail: fomenko85@mail.ru

R.N. FOMENKO

THE METHODOLOGY ELECTION OF MACHINING CONDITIONS FOR TURNING WITH COATED TOOLS OF CRITICAL PARTS

The influence of cutting tools nanostructured coatings on the parameters of machined parts surface layer has been researched. The interaction between friction characteristics of coated tools and shear plane angle during machining has been determined. The results of different materials cutting with coated carbide-tipped tools have been shown.

Key words: *nanostructured coatings, quality parameters of the surface layer, friction coefficient, shear plane angle, optimal cutting speed*

BIBLIOGRAPHY

[1]Bezjazichniy, V. F. Similitude method in the mechanical engineering [Text] / V.F. Bezjazichniy.- Moscow: Engineering. – 2012. – 320 p.

[2]Bezjazichnij, V. F. Rapid method of thermocouples calibration [Text] / Bezjazichnij V. F., Timofeev M. V., Fomenko R. N. // Handbook. An engeneering journal. 2010. – № 7. – Pp. 38–42.

[3]Certificate of state registration of computer programs №2011613369 « Calculated determination of optimum cutting conditions when turning with nanostructured coated tools» [Text] / Bezjazichnij V. F., Sutjagin A. N., Fomenko R. N. Application №2011611697, registered in the Registry of Computer Programs 29.04.2011.

Fomenko Roman Nikolaevich
Can. Sc. technical, chief lecturer
FSBEIHPE «Rybinsk State Aviation Technical University»
named after P.A. Solovjev
Phone: 8(4855) 222-091
E-mail: fomenko85@mail.ru

УДК: 681.3

В.П. ИВАНОВ

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОСОБОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ МЕТОДОМ ОГИБАЮЩИХ

В статье рассматриваются вопросы синтеза алгоритмов особого управления методом огибающих. Доказывается, что особое управление в общем случае является огибающей семейства параметрических поверхностей и что его можно найти на этом семействе. Такой подход в ряде случаев упрощает проблемы синтеза алгоритмов и их практическую реализацию.

***Ключевые слова**: оптимальное управление, особое управление, динамическое системы, метод огибающих.*

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация управления для определенного вида динамических систем в ряде случаев приводит к особому оптимальному управлению. Для синтеза алгоритмов особого управления иногда удобно использовать подход, суть которого излагается ниже.

Рассмотрим динамическую систему вида:

$$\frac{dx_j}{dt} = f_j(x) + B_j(x)u_j, \quad j=1, \dots m,$$
$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x), \qquad i=m+1, \dots n, \tag{1}$$

где: t - действительная переменная; $t \in \Im(t)$; $\Im(t)$ - открытое множество вещественной оси t; $\Im(t) = (-\infty, \dots, +\infty)$; $x = (x_1, \dots, x_n)$ - вектор состояния действительного n-мерного пространства; $f = (f_1, \dots, f_n)$ и $B = (B_1, \dots, B_m)$ - заданные вектор-функции; $B_j \neq 0, \quad j = 1, \dots, m$; $u = (u_1, \dots, u_m)$ - m-мерный вектор управления; $u \in U$; U - заданное множество допустимых управлений; $m < n$.

Задан терминальный функционал:

$$J = F\left[x_i(T), \quad i = m+1, \dots, n\right], \tag{2}$$

определенный на решениях системы уравнений (1). F - некоторая функция; $T \in \Im(t)$.

В момент $t = T$ могут быть заданы дополнительные условия вида

$$h_i = h_i\left[x(T)\right], \quad i = 1, \dots, n, \tag{3}$$

которые могут быть включены в функционал (2) через дополнительные множители Лагранжа.

Так как система уравнений (1) автономная, то множество $\Im(t)$ допустимо сузить до отрезка $[t_0, T]$, где t_0 - начальное значение аргумента t, $t_0 \in \Im(t)$. Момент времени T не фиксирован.

Значения $x(t_0) = x_0$ полагаются известными.

Сформулируем задачу оптимального управления следующим образом: среди всех допустимых на отрезке $[t_0, T]$ управлений $u \in U$, переводящих точку (t_0, x_0) в точку $(T, x(T))$, найти такие, для которых функционал (2), определенный на решениях системы уравнений (1), принимает наименьшее значение при выполнении условий (3).

Введем вектор-функцию множителей Лагранжа $p = (p_1, \ldots, p_n)$ и составим гамильтониан задачи оптимизации H:

$$H = \sum_{i=1}^{n} p_i f_i + \sum_{j=1}^{m} p_j B_j u_j . \tag{4}$$

С использованием функции H в пространстве переменных $D^n(x, p)$, $x \in D^n(x, p)$, $p \in D^n(x, p)$, уравнения для x и p запишутся в следующей канонической форме:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{\partial H}{\partial p}, \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial x}. \end{aligned} \tag{5}$$

Отметим, что H и p на оптимальном решении непрерывны и к этому же приводит аналог условия Эрдмана–Вейерштрасса классического вариационного исчисления. Непрерывность сохраняется и в том случае, когда правые части уравнений (1) терпят разрыв.

Для оптимального управления $u(t)$ и фазовой траектории $x(t)$ в рамках принципа максимума необходимо существование такого ненулевого вектора p, что выполняются следующие условия [1, 2]:

1) Функция H переменного $u \in U$ при каждом $t \in [t_0, T]$, т.е. при фиксированных x, p, достигает при $u = u_{opt}(t)$ минимума:

$$H(x_{opt}, u_{opt}, p) = \min_{u \in U} H(x, u, p). \tag{6}$$

Таким образом, оптимальное управление на границе множества допустимого управления определяется как:

$$u_{opt} = arg \min_{u \in U} H(x, u, p). \tag{7}$$

2) Выполняются условия трансверсальности:

$$\left[H\delta t - \sum_{i=1}^{n} p_i \delta x_i \right]_{t_0}^{T} + \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\mu_i \frac{\partial h_i}{\partial x_i} + \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \delta x_i \right]_{t_0}^{T} = 0, \tag{8}$$

где δt, δx_i - произвольные вариации соответствующих переменных; $\mu = (\mu_1, \ldots, \mu_n)$ — вектор констант.

Обобщенные условия трансверсальности в силу независимости вариаций приводят к соотношениям:

$$\begin{aligned} &[H]_{t_0}^{T} = 0, \\ &p_i = \left[\frac{\partial F}{\partial x_i} + \mu_i \frac{\partial h_i}{\partial x_i} \right], \quad i = 1, \ldots, n. \end{aligned} \tag{9}$$

Непосредственным следствием системы уравнений (5) и условия (6) является выполнение соотношения: $\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t}$.

С учетом (9) для автономных систем при незаданном явно аргументе имеем:

$$H = const = 0. \tag{10}$$

На участке особого управления выполняются соотношения (см. [2]), из которых его и находят:

$$\frac{d^k}{dt^k}\left(\frac{\partial H}{\partial u_j}\right)=0, \qquad (11)$$

$$k=0,1,\ldots,2p_s$$

(p_s - порядок сингулярности) при выполнении следующих необходимых условий оптимальности:

$$(-1)^{p_s}\frac{\partial}{\partial u_j}\left[\frac{d^{2p_s}}{dt^{2p_s}}\left(\frac{\partial H}{\partial u_j}\right)\right]\geq 0, \qquad (12)$$

$$p_s=0,1,2,\ldots$$

если $det\left\{\frac{\partial^2 H}{\partial u_i\,\partial u_j}\right\}\equiv 0, \quad i,j=1,\ldots,m.$

Из системы уравнений (11) с учетом соотношений (12) следует, что особое оптимальное управление определяется как $u_{j\,osob}=u_{j\,osob}(x,p)$.

Отметим, что если в начальный момент времени значения x известны (или могут быть оценены), то вектор p определен (с точностью до констант) лишь на правом конце фазовой траектории. Возникает специфическая краевая задача, после решения которой («в принципе») тем или иным способом можно найти $p(t)$, а, следовательно, и $u_{j\,osob}$. Однако, вычислительные трудности, стоящие на этом пути, методические ошибки численных методов и ошибки округлений делают процесс нахождения достоверных значений весьма трудным, а зачастую (например, при выполнении требования реального масштаба времени) и невозможным. Поэтому представляется желательным использовать нетрадиционные методы синтеза оптимального управления, одним из которых, в частности, является метод огибающих.

Сначала докажем, что оптимальная траектория динамической системы в фазовом пространстве, определяемая в смысле минимизации функционала (2), является огибающей семейства мгновенных решений, проведенных из каждой ее точки, и что оптимальное управление может быть найдено на семействе мгновенных решений.

Представим уравнение (10) в следующем виде:

$$H\left[x,u_{opt}(x,p),p\right]=H(x,p)=0. \qquad (13)$$

Введем непрерывную функцию $W(x)$ такую, что $W(x(T))=J=F\left[x(T)\right]$ и $p=\frac{\partial W}{\partial x}$, и приведем уравнение (13) к уравнению Гамильтона-Якоби:

$$H(x,p)=H\left(x,\frac{\partial W}{\partial x}\right)=0. \qquad (14)$$

Так как функция W входит в уравнение (14) только своими частными производными, то она определяется с точностью до аддитивной постоянной W_0., т.е.: $W=W_p(x,\alpha)+W_0$, где $\alpha=(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)$ - вектор независимых параметров, а $W_p(x,\alpha)$ - решение уравнения (14).

Запишем уравнение гиперповерхности [3]

$$S=W-W_p(x,\alpha)-W_0 \qquad (15)$$

в $(n+1)$-мерном пространстве переменных $W,x_1,\ldots,x_n$. Из-за наличия $(n+1)$ независимых параметров $W_0,\alpha_1,\ldots,\alpha_n$ эта гиперповерхность является $(n+1)$-параметрическим семейством гиперповерхностей. Параметр W_0 вызывает лишь сдвиг вдоль оси W, поскольку

$\frac{\partial S}{\partial W_0} = -1 \neq 0$. Примем:

$$\begin{aligned} W_0 &= W_0(\gamma_1, \ldots, \gamma_n) \\ \alpha_\nu &= \alpha_\nu(\gamma_1, \ldots, \gamma_n), \quad \nu = 1, \ldots, n \end{aligned} \tag{16}$$

где $\gamma_1, \ldots, \gamma_n$ - параметры, такие, что $\frac{\partial W}{\partial \gamma_i} \neq 0, \quad \frac{\partial \alpha_\nu}{\partial \gamma_i} \neq 0, \quad i = 1, \ldots, n, \quad \nu = 1, \ldots, n$ и построим огибающие относительно параметров $\gamma_1, \ldots, \gamma_n$:

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma_\nu} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial W}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma_\nu} - \sum \frac{\partial W_p}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma_\nu} - \frac{\partial W_0}{\partial \gamma_\nu} = 0, \quad \nu = 1, \ldots, n. \tag{17}$$

Выбором функций (16) добьемся, чтобы $det\left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial \gamma_\nu}\right) \neq 0, \quad i, \nu = 1, \ldots, n$.

Тогда уравнения (17) будут иметь решения:

$$\beta_\nu = \frac{\partial W}{\partial \alpha_\nu}, \quad \nu = 1, \ldots, n. \tag{18}$$

С другой стороны, если W - полный интеграл уравнения (14), то по теореме Якоби имеем:

$$\beta = \frac{\partial W}{\partial \alpha}, \qquad p = \frac{\partial W}{\partial x}. \tag{19}$$

Потребуем, чтобы α и β удовлетворяли преобразованию гамильтониана $H(x, p)$ в гамильтониан $H(\alpha)$, а также каноническим уравнениям, которые, ввиду (14), запишутся как

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \alpha} = 0. \tag{20}$$

Из (16-20) следует, что оптимальные траектории являются огибающими n-параметрического семейства поверхностей.

Представим функцию $W_p(x, \alpha)$ в виде суммы функций, каждая из которых зависит только от одной из переменных $x_\nu, \nu = 1, \ldots, n$, т.е.:

$$W = \sum_{\nu=1}^{n} W_\nu^\kappa(x_\nu, \alpha) + W_0. \tag{21}$$

Определим канонические переменные $p_\nu, \quad \nu = 1, \ldots, n$:

$$p_\nu = \frac{\partial W}{\partial x_\nu} = \frac{\partial W_\nu^\kappa(x_\nu, \alpha)}{\partial x_\nu}, \quad \nu = 1, \ldots, n. \tag{22}$$

Согласно выражениям (22), переменные $p_\nu, \quad \nu = 1, \ldots, n$ оказываются функциями только одной x_ν и α, в то время, как уравнения (1), (5), (19) говорят о том, что $p_\nu, \quad \nu = 1, \ldots, n$ в общем случае должны быть функциями всех $x_1, \ldots, x_n$ и остальных $p_i, \quad i = 1, \ldots, n, \quad i \neq \nu$. Это противоречие может быть устранено, если приравнять $\alpha_\nu, \quad \nu = 1, \ldots, n$ некоторые определенные комбинации переменных $x_1, \ldots, x_n$, «замороженных» в данный момент времени, т.е.:

$$\alpha_\nu = \alpha_\nu(x_1, \ldots, x_n), \quad \nu = 1, \ldots, n. \tag{23}$$

Из выражений (16), (19), (22), (23) следует, что $p_1, \ldots, p_n$ и управление u_{opt}, можно определить на параметрическом семействе поверхностей, которое огибает оптимальная траектория, если в качестве параметров $\gamma_1, \ldots, \gamma_n$ соответствующим образом взять фазовые координаты, а уравнения (17) будут разрешимы относительно частных производных W_p по па-

раметрам $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$. Фиксируя в качестве параметров «замороженные» в текущий момент времени значения фазовых координат, мы тем самым на семействе поверхностей определим семейство кривых. Назовем их мгновенными решениями, поскольку они определяются функцией W_p, являющейся решением уравнения (14).

В рамках решения уравнения (14) можно использовать в качестве мгновенных решений произвольные заданные функции, удовлетворяющие условиям (17), (19) - (23).

С другой стороны, соотношения (18)-(23) говорят о том, что для построения мгновенных решений можно производить условное разделение переменных в уравнении Гамильтона-Якоби (см. [3]).

Отметим, что мгновенные решения должны удовлетворять условию минимизации функционала (2) относительно используемых параметров.

Таким образом, оптимальная траектория динамической системы в фазовом пространстве является огибающей семейства мгновенных решений, проведенных из каждой ее точки.

Представим уравнения (5) для $p = (p_1, \ldots, p_n)$ в следующей форме:

$$\frac{dp_\nu}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_\nu} = -p_\nu\left(\frac{\partial f_\nu}{\partial x_\nu} + \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\nu}\cdot u_\nu\right) - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq\nu}}^{m} p_j\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_\nu} + \frac{\partial B_j}{\partial x_\nu}\cdot u_j\right) - \sum_{i=m+1}^{n} p_i\frac{\partial f_i}{\partial x_\nu} \qquad (24)$$

$\nu = 1, \ldots, m$

Преобразуем это уравнение к виду:

$$\frac{dp_\nu}{dt} + \Phi_\nu\, p_\nu = G_\nu \quad \nu = 1, \ldots, m, \qquad (25)$$

где: $\Phi_\nu = \left(\frac{\partial f_\nu}{\partial x_\nu} + \frac{\partial B_\nu}{\partial x_\nu}\cdot u_\nu\right)$, $G_\nu = -\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq\nu}}^{m} p_j\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_\nu} + \frac{\partial B_j}{\partial x_\nu}\cdot u_j\right) - \sum_{i=m+1}^{n} p_i\frac{\partial f_i}{\partial x_\nu}$.

Проинтегрировав уравнение (25), получим:

$$p_\nu = exp(-\int \Phi_\nu\, dt)\left[\int G_\nu\, exp(\int \Phi_\nu\, dt) - C_\nu\right] \quad \nu = 1, \ldots, m, \qquad (26)$$

Постоянные C_ν, $\nu = 1, \ldots, n$ находятся из условий трансверсальности (9).

Отметим, что знак функций p_ν, $\nu = 1, \ldots, n$ определяется знаком функций G_ν.

Первоначально рассмотрим случай, когда порядок сингулярности равен единице. Тогда особое управление можно найти из системы уравнений:

$$p_j = 0, \quad \frac{dp_j}{dt} = 0, \quad \frac{d^2 p_j}{dt^2} = 0, \quad j = 1, \ldots, m. \qquad (27)$$

Из первых двух уравнений системы (27) следует, что $G_j = 0$. Разрешим это уравнение относительно переменной x_j. Если корень существует, то:

$$x_j = \eta_j(x_\nu, p_\nu;\ \nu = 1, \ldots, n;\ \nu \neq j). \qquad (28)$$

Тогда третье уравнение системы (27) после преобразований запишем как:

$$\frac{dG_j}{dt} = \frac{\partial G_j}{\partial x_j}\left(f_j + B_j u_{j\,osob}\right) + \frac{\partial G_j}{\partial \eta_j}\cdot\frac{d\eta_j}{dt} = 0.$$

Из последнего соотношения можно найти особое управление:

$$u_{j\,osob} = -\frac{f_j + \left(\frac{\partial G_j}{\partial \eta_j}\cdot\frac{d\eta_j}{dt}\right)\Big/\frac{\partial G_j}{\partial x_j}}{B_j} \qquad (29)$$

при выполнении необходимых условий оптимальности в следующей форме:

$$B_j \left.\frac{\partial G_j}{\partial x_j}\right|_{x_j=\eta_j} \le 0, \quad j = 1,\ldots,m. \tag{30}$$

Отметим, что корень уравнения $G_j = 0$ необязательно может быть единственным. Тогда каждый корень проверяется на выполнение необходимых (30) и достаточных (2) условий оптимальности.

Отметим также, что на мгновенном решении $x_j = const = \eta_j$.

В случае нулевого порядка сингулярности p_j (см. (26)) либо сохраняет знак, либо становится равным нулю лишь в одной точнее на конце отрезка. Дополнив условие $p_j = 0$ условиями первого порядка сингулярности, мы приходим к аналогичному выражению.

В случае, когда порядок сингулярности превышает единицу, то, выделив условие сингулярности первого порядка $G_j = 0$, или, соответственно, $x_j = \eta_j$, а затем, продифференцировав его $2p_s - 1$ раз, можно найти особое управление как:

$$u_{j\,osob} = f\left(x, \eta_j, \frac{d\eta_j}{dt}, \ldots, \frac{d^{2p_s-1}\eta_j}{dt^{2p_s-1}}\right). \tag{31}$$

Следовательно, особое оптимальное управление в рамках заданного терминального критерия оптимальности можно найти на семействе мгновенных решений.

Рассмотрим пример.

Требуется минимизировать функционал $J = \sqrt{\left[x_3(T) - x_3^k\right]^2 + \left[x_4(T) - x_4^k\right]^2}$, где x_i^k, $i = 3, 4$ - заданные значения соответствующих координат, определенный на решениях следующей системы уравнений:

$$\frac{dx_1}{dt} = A(u - \cos x_1),$$

$$\frac{dx_2}{dt} = B,$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_2 \sin x_1,$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_2 \cos x_1,$$

где u - управление, A, B - положительные константы.

Уравнения Гамильтона-Якоби имеет вид:

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} A(u - \cos x_1) + \frac{\partial W}{\partial x_2} B + \frac{\partial W}{\partial x_3} x_2 \sin x_1 + \frac{\partial W}{\partial x_4} x_2 \cos x_1 = 0.$$

Для нахождения мгновенных решений условно разделим переменные в уравнении Гамильтона-Якоби:

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} A(u - \cos x_1) + \alpha_2 + \alpha_3 x_2 \sin x_1 + \alpha_4 x_2 \cos x_1 = 0,$$

$$\frac{\partial W}{\partial x_2} B = \alpha_2, \quad \frac{\partial W}{\partial x_3} = \alpha_3, \quad \frac{\partial W}{\partial x_4} = \alpha_4.$$

Определим функцию W:

$$W = (\alpha_2 + \alpha_3 x_2 \sin x_1 + \alpha_4 x_2 \cos x_1)(t - T) + \alpha_2 \int_{x_2(t)}^{x_2(T)} \frac{dx_2}{B} + \alpha_3 \int_{x_3(t)}^{x_3(T)} dx_3 + \alpha_4 \int_{x_4(t)}^{x_4(T)} dx_4 + W_0.$$

Определим мгновенные решения:

$x_1 = \eta, \quad x_2(T) = x_2(t) + B(T-t),$

$x_3(T) = x_3(t) + x_2 \sin\eta \cdot (T-t),$

$x_4(T) = x_4(t) + x_2 \cos\eta \cdot (T-t).$

Подставляя эти значения в функционал и, минимизируя последний, после преобразований получим, что $tg\,\eta = \dfrac{x_3^k - x_3(T)}{x_4^k - x_4(T)}$.

Выражение для управления примет вид: $u = \cos\eta + \dfrac{1}{A} \cdot \dfrac{d\eta}{dt}$.

На мгновенных решениях выполняются соотношения: $x_1 = \eta$ или $x_1 = \eta \pm \pi$. $\eta = const$.

ВЫВОДЫ:

1) Доказано, что оптимальная траектория динамической системы в фазовом пространстве является огибающей семейства мгновенных решений, проведенных из каждой ее точки.

2) Показано, что оптимальное управление может быть найдено на семействе мгновенных решений.

3) Указанное представление особого оптимального управления в ряде случаев упрощает синтез алгоритмов.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления [Текст] / В.Г. Болтянский. - М.: Наука, 1969. - 408 с.

2. Габасов, Р. Особое оптимальное управление [Текст] / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова. - М.: Наука, 1973. - 256 с.

3. Шмутцер, Э. Основные принципы классической механики и классической теории поля (канонический аппарат) [Текст] / Э. Шмутцер. - М.: Мир, 1976. - 157 с.

Владимир Петрович Иванов
Кандидат технических наук, доцент,
Старший научный сотрудник
Санкт-Петербургского института
информатики и автоматизации
Российской академии наук.
Тел.: (812)328-19-19,
E-mail: vpivanov.spb.su@gmail.com.

V.P. IVANOV

SYNTHESIS OF THE ALGORITHMS FOR DYNAMIC SYSTEMS SINGULAR CONTROL WITH THE ENVELOPE METHOD

We described the envelope method applied for dynamic systems singular control and for the synthesis of his algorithms.

Key words: *optimal control, singular control, dynamic systems, envelope method.*

BIBLIOGRAPHY

[1] Boltiansky, V.G. Mathematics methods for the optimal control [Text] / V.G. Boltiansky. - M. Nauka, 1969. - 408 p.

[2] Gabbasov, R. Singular optimal control [Text] / R. Gabbasov, F.M. Kirillova. - M. Nauka, 1973. - 256 p.

[3] Schmutzer, E. The main principals of classical mechanics and classical theory of a field [Text] / E. Schmutzer. - M.: Mir. - 1976. - 157 p.

Vladimir Petrovich Ivanov
Can. Sc. technical,
senior research associate
of Saint-Petersburg institute
for the informatics and automation
of Russian Academy of Sciences.
SpbPhone: (812) 328-19-19,
E-mail: vpivanov.spb.su@gmail.com.

УДК 681.2 : 519.763

Д.Д. КУЛИКОВ, Н.В. ГОЛОДНЫЙ

СОЗДАНИЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СРЕДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье рассматривается процесс создания многоагентной распределенной системы технологического назначения. Особое внимание уделяется вопросам интеграции систем и формированию единого информационного пространства.

Ключевые слова: *интеграция, САПР ТП, многоагентная среда.*

ВВЕДЕНИЕ

В производстве предъявляются все более строгие требования к обеспечению выпуска высококачественной продукции, отвечающей современному уровню развития науки и техники. Этот уровень характеризует: усложнение конструкции изделий, повышение точности и качества их изготовления; снижение трудоемкости, себестоимости, увеличение долговечности и надежности и т.п. Выполнить эти требования можно на основе комплексной автоматизации технической и технологической подготовки производства.

В настоящее время разработчики автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) все больше внимания уделяют созданию программ, выполненных в виде веб-сервиса. Данный подход соответствует парадигме облачных вычислений. На сегодняшний день не существует программных комплексов, которые могли бы в полной мере отвечать потребностям современного производства. Поэтому возникают вопросы сопряжения различных систем, таких как CAD, CAPP, PLM и т.д. Следует учитывать, что подсистемы могут различаться степенью автоматизации работ по проектированию и управлению, характером проблемно-ориентированных языков конструирования, технологического проектирования и управления, временным интервалом между получением результатов в одной системе и их использованием в других системах. В связи с этим возникает сложная задача обеспечения совместимости между подсистемами по всем видам связей. Под совместимостью будем понимать общность указанных подсистем АСТПП в формализованных языках, характере и структуре входных и выходных документов, времени их получения и использования, которая обеспечивает возможность их взаимодействия.

На кафедре Технологии приборостроения НИУ ИТМО разрабатывается ряд систем, направленных на решение интеллектуальных задач при проектировании технологических

процессов. В связи с этим возникает необходимость решения вопросов интеграции этих систем, а также их внедрения в уже созданные МАС технологической подготовки производства (ТПП) с целью дальнейшего повышения интеллектуального уровня АСТПП в целом.

В данной работе предлагается рассмотреть возможные способы связи необходимого числа агентов в единое информационное пространство.

ВИДЫ СОВМЕСТИМОСТИ

В настоящее время различают информационную, функциональную, программную и организационную совместимость систем. Исследования в области информационной совместимости на уровне подсистем ТПП позволили выделить два вида совместимости: параметрическую и структурную.

Необходимость в параметрической совместимости вызвана тем, что выходные параметры одной подсистемы могут служить входными параметрами для другой подсистемы. Поэтому параметрическую совместимость определим через совместимость параметров. В свою очередь критерии такой совместимости могут быть выражены через атрибуты параметров, основные из которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Атрибуты параметров

Группа атрибутов		Наименование атрибута
1	Идентификационные атрибуты	Системный номер
		Наименование параметра
		Обозначение параметра
2	Атрибуты для значения параметра	Тип значения параметра
		Длина значения параметра
		Кол-во знаков после запятой
3	Семантические атрибуты	Размерность параметра
		Минимальное значение параметра
		Максимальное значение параметра
		Список допустимых значений параметра
		Классификатор значений параметра

Конкретный состав атрибутов зависит от типа параметра (целый, действительный или текстовый).

Выделим три вида совместимости параметров:

1. идентификационная;
2. синтаксическая;
3. семантическая.

Идентификационная совместимость заключается в том, что одинаковые понятия, используемые в разных системах должны иметь одинаковое наименование и обозначение параметров, которые их отражают, т. е. должно быть совпадение 1-ой группы атрибутов. Такая совместимость необходима для поиска и использования одного и того же параметра разными подсистемами. Назначение атрибута «Системный номер» будет рассмотрено позже.

Синтаксическая совместимость параметров от разных подсистем заключается в совпадении атрибутов 2-ой группы.

Семантическая совместимость двух параметров от разных подсистем заключается в совпадении 3-ей группы атрибутов. С теоретической точки зрения семантическая совместимость означает совпадение понятий, отображаемых параметрами. Совпадение понятий означает совпадение объемов понятий и терминов, которые отображают эти понятия. Например, если значение параметра является кодом, то необходимо совпадение применяемых классификаторов. Для параметра «Группа материала» в одной системе может быть использован ко-

дификатор ЕСТД, а в другой системе – собственный кодификатор предприятия. В большинстве случаев размерность параметров остается вне поля зрения разработчиков подсистем, в тоже время при интеграции подсистем необходимо ее учитывать. Например, точность размера может быть задана в мм, либо в мкм, либо обозначением поля допуска и квалитетом.

Если интервал значений параметра передаваемого от i-ой подсистемы является более широким, чем это нужно для j-ой подсистемы, то имеет место семантическая несовместимость, т. к. предельные значения параметра могут быть не восприняты j-ой системой. В данном случае имеет место ситуация, когда объем второго понятия больше объема первого. Таким образом, семантическая несовместимость двух параметров - это результат несовпадения двух понятий, за которыми закреплены эти параметры.

ОЦЕНКА СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ

Предположим, что имеются подсистемы *M* и *N*. Необходимо определить насколько они информационно совместимы между собой. В рассмотрении участвуют входные параметры подсистемы *N* и результирующие параметры подсистемы *M*. Множество выходных параметров подсистемы *M* назовем порождающей средой (ПС) для *N*, т. к. они являются входными для *N*.

Пусть p_i – параметр, входящий в ПС, p_j – параметр подсистемы *N*. Для оценки совместимости двух параметров введем «коэффициент совместимости параметров». Этот коэффициент KS_{ij} для параметров p_i и p_j определим следующим образом:

$$KS_{ij} = \frac{2a'_{ij}a''_{ij}}{kp_i + kp_j} \sum_{k=1}^{ka} SA^k{}_{ij}, \qquad (1)$$

где kp_i и kp_j – количество атрибутов, закрепленных за pi и - pj – параметрами;

$SA^k{}_{ij}$ - коэффициент сравнения k-ого атрибута для pi и - pj – параметров;

ka – количество одинаковых атрибутов у pi и - pj – параметров;

a'_{ij} - коэффициент сравнения по наименованию pi и - pj – параметров;

a''_{ij} - коэффициент сравнения по обозначению pi и - pj – параметров.

В свою очередь $SA^k_{ij} = \begin{cases} 1, если\ a^k_i = a^k_j; \\ 0, если\ a^k_i \neq a^k_j; \end{cases}$, где a^k_i и a^k_j - значения k-ого атрибута для p_i и - p_j – параметров.

Значения a'_{ij} и a''_{ij} определим следующим образом:

$$a'_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{ если совпадают наименования pj и pj параметров}; \\ 0, \textit{ если не совпадают наименования pj и pj параметров}; \end{cases}$$

$$a''_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{ если совпадают обозначения pj и pj параметров}; \\ 0, \textit{ если не совпадают обозначения pj и pj параметров}; \end{cases}$$

Параметр p_j будем называть несовместимым, если для всех p_i, входящих в порождающую среду имеет место KS_{ij}=0.

Параметр p_j будем называть совместимым, если найдется p_i, входящий в порождающую среду, для которого имеет место частичная совместимость ($0 < KS_{ij} < 1$).

Параметр p_j будем называть эквивалентным, если найдется p_i, входящий в порождающую среду, для которого имеет место полная совместимость ($KS_{ij} = 1$).

Для оценки информационной совместимости систем введем коэффициент использования порождающей среды KI_{mn}:

$$KI_{mn} = \left(1 - \frac{NP_{mn}}{NV_n}\right)100\%, \qquad (2)$$

где NP_{mn} - количество несовместимых параметров в системе *N*;

NV_n - количество входных параметров в системе *N*.

Этот коэффициент показывает, насколько порождающая среда соответствует информационной потребности системы *N*, т.е. какой процент входных параметров совместим с выходными параметрами системы *M*.

Если $KI_{mn}=0$, то это свидетельствует о полной информационной несовместимости систем.

Если $0 < KI_{mn} < 100$, то это говорит о том, что имеет место неполное использование порождающей среды, т.е. не все входные параметры системы *N* совместимы с порождающей средой. В этом случае необходимо расширять порождающую среду путем использования других подсистем для передачи информации входным параметрам системы *N*.

Если $KI_{mn}=100$ %, то это свидетельствует о полном использовании порождающей среды, т. е. имеет место информационная совместимость систем.

Введем коэффициент полноты информационной совместимости KPS_{mn}.

$$KPS_{mn} = \frac{100}{NV_n} \sum_{i=1}^{km} \sum_{j=1}^{kn} KS_{ij} \ \%, \tag{3}$$

где km – количество выходных параметров для системы *M*;

kn – количество входных параметров для системы *N*.

Расчет по этой формуле ведется лишь при $KI_{mn}=100$ %, т.е. в расчетах по формуле 3 участвуют только совместимые параметры, и следовательно $0 < KPS_{mn} \leq 100$. Чем KPS больше, тем выше информационная совместимость систем, так как этот коэффициент является средневзвешенным показателем количества совпадающих атрибутов для всех совместимых параметров.

В первом приближении можно считать, что трудоемкость разработки интерпретатора для преобразования выходных параметров системы *M* во входные параметры системы *N* обратно пропорциональна величине KPS_{mn}, однако в расчетах этого коэффициента участвуют и эквивалентные параметры, которые не требуют никаких преобразований. Поэтому формулу 3 изменим следующим образом.

$$KPS_{mn} = \frac{100}{NV_{ns}} \sum_{i=1}^{km} \sum_{j=1}^{kn} KS_{ij} \ \%, \tag{4}$$

где NV_{ns} – количество совместимых параметров систем *M* и *N*.

В этой формуле используются только совместимые параметры для которых $0<KS_{ij}<1$. Для учета эквивалентных параметров введем коэффициент KSE_{mn} учета эквивалентных параметров систем:

$$KSE_{mn} = \frac{NVE_{mn}}{NV_n} 100\%, \tag{5}$$

где NVE_{mn} – количество эквивалентных параметров систем *M* и *N*.

Если $KSE_{mn}=100$ %, то это свидетельствует о полной информационной совместимости, при которой нет необходимости в преобразовании выходных параметров системы *M* во входные параметры системы *N*. В этой ситуации $KI_{mn}=0$ и $KPS_{mn}=0$.

Рассмотренные коэффициенты позволяют оценить возможности интеграции подсистем ТПП и дают количественные оценки информационной совместимости этих подсистем. Если $0 < KPS_{mn} < 100$, то необходимо разработать интерфейсный слой между системами *M* и *N*. Иначе говоря, необходимо разработать соответствующий интерпретатор, переводящий сообщение S_m на языке системы *M* в сообщение S_n на языке системы *N*.

ВЫБОР ВИДА ИНТЕРПРЕТАТОРА

Возможные различия между подсистемами АСТПП приводят к необходимости ввода специальных интерпретаторов для достижения совместимости подсистем. Интерпретаторы выполняют функции информационной и пространственно-временной совместимости внутри многоагентной системы (МАС).

В данной работе под интерпретаторами предлагается понимать агенты МАС, выполняющие роль посредников между подсистемами АСТПП (рисунок 1).

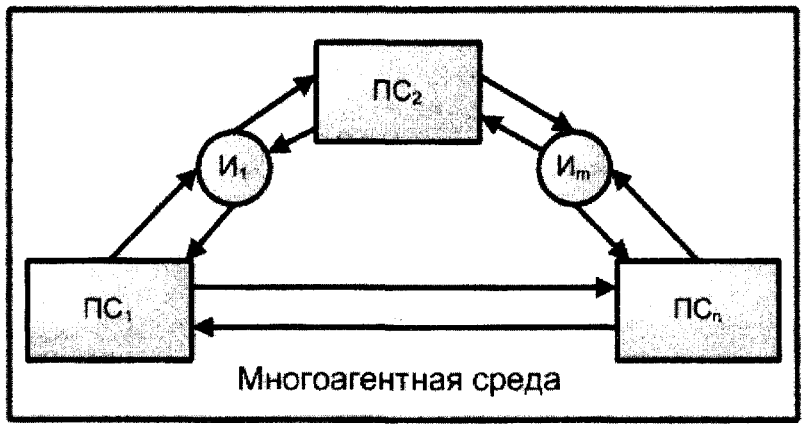


Рисунок 1 – Схематичное изображение МАС
Где ПС – подсистема АСТПП;
И – интерпретатор.

Иначе говоря, интерпретатор является подключаемым агентом МАС, вызывающийся при необходимости и выполняющий преобразование выходного языка одной подсистемы во входной язык другой. Таким образом, решая проблему семантической, синтаксической и идентификационной совместимости, интерпретатор создает условия для возникновения единого информационного пространства. Применение механизмов интерпретирования является одним из необходимых шагов для придания разрозненным подсистемам АСТПП статуса полноценных агентов МАС.

В работах Цветкова В.Д. рассматривается возможность построения интегрированных САПР ТП. В этих работах предлагается единый модуль стандартизации/нормализации.

В данной статье предлагается создавать отдельный интерпретатор для каждой подсистемы. Это связано с тем, что на сегодняшний день в мире существует большое число производителей программного обеспечения, нацеленного на решения задач технологической подготовки производства (ТПП). При этом не существует какого либо регламента, посредством которого возможно было бы ограничить требования систем к синтаксическому и семантическому формату входных и выходных данных. Создание мощного единого интерпретатора влечет за собой проблемы сложности разработки, поддержки работоспособности и мобильности системы, а также увеличение временных издержек обработки запроса. С другой стороны создание локальных интерпретаторов, связанных непосредственно с подсистемой АСТПП упрощает и удешевляет обновление интерпретаторов в связи с расширением или изменением состава входных/выходных параметров подсистемы. Немаловажен и тот аспект, что некоторым организациям, в связи с какими-то обстоятельствами может потребоваться применение строго определенных подсистем в составе АСТПП. В этом случае создание локальных интерпретаторов избавит от необходимости держать в оперативной памяти системы лишние данные, не относящиеся к используемым агентам (подсистемам).

ВЫБОР ЯЗЫКА

Исходя из проведенных исследований и анализа предметной области введено понятие фактов и целей системы и представление их в виде триплетов [5], которое основывается на двухуровневом описании характеристик объектов. Под триплетом понимается специальная форма описания в символьном представлении по следующей схеме:

"объект – имя характеристики – отношение – значение – комментарий".

Данные, известные системе в текущий момент, будем называть фактами. Каждый факт представляется в виде триплета Ф=<Prefix,Name,Value>, где Prefix - префикс, Name - имя параметра, Value - значение параметра. Здесь префикс обеспечивает контекстное понятие параметра, т.е. указывает на конкретный описываемый объект. Например, если L - имя параметра, указывающее в общепринятых обозначениях длину описываемого объекта, то выражение Z.L будет обозначать длину заготовки, при условии, что Z - это префикс, указывающий на объект "заготовка". Кроме того, для обеспечения функций нечеткой логики значение каждого факта может быть снабжено коэффициентом уверенности. Таким образом, формируется некоторое множество (пространство) фактов F, которое в процессе проектирования размещается в виртуальном строковом пространстве технологических данных (ВСПТД): F U Фi , где Фi - триплет i-го факта.

Для поддержания информационной связи внутри МАС, как правило, строятся сообщения/запросы, имеющие в своем составе более одного параметра. В связи с этим, представляется целесообразным воспользоваться структурой, которую предлагает теория фреймов.

Термин фрейм впервые был предложен Марвином Минским [7] в конце 70-х годов для обозначения структуры знаний для восприятия пространственных сцен. Фрейм - это абстрактный образ для представления стереотипа объекта, понятия или ситуации.

Фрейм представляет собой комплексный пакет знаний, хранимый в человеческом сознании, либо в памяти компьютера. Каждый фрейм содержит отделения — слоты, в которых собраны атрибуты (характеристики) и соответствующие им значения.

Традиционно структура фрейма может быть представлена как перечень свойств.

(ИМЯ ФРЕЙМА :

(имя 1-го слота: значение 1-го слота),

(имя 2-го слота: значение 2-го слота),

...

(имя N-го слота: значение N-го слота))

В данной работе предлагается рассматривать фрейм как набор свойств различных объектов, необходимых для осуществления взаимодействия между агентами. Таким образом, использование триплетов языка ВСПТД совместно с фреймовым представлением данных и знаний позволяет создать легко адаптируемую, расширяемую языковую систему единого информационного пространства МАС. Более подробное рассмотрение теории фреймов приведено в работах [5,7] и выходит за рамки данной статьи.

СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАС

В настоящее время существует ряд стандартов FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents - Фонд интеллектуальных физических агентов), описывающих правила взаимодействия агентов внутри МАС. Подробное описание стандартов приведено на сайте организации, поэтому в данной работе, приведены только наиболее существенные для создания на их основе структуры проектируемой системы.

В соответствии со стандартами FIPA:

1. агентам должен быть предоставлен сервис желтых страниц, хранящий точный и полный список агентов системы;
2. МАС должна содержать в своей структуре систему управления агентами. Данная система отвечает за управление такими операциями как создание и удаление агентов, контроль за перемещениями агентов, а также следит за состоянием агента (например, активен, работа приостановлена, в режиме ожидания) и его транспортными адресами;
3. агентам должен быть предоставлен сервис белых страниц, где агенты могут узнавать адреса других агентов.

Организация взаимодействия между агентами добавляет накладные расходы на передачу данных между агентами (рисунок 2). Интерпретатор любого агента должен иметь возможность определить что он должен сделать. Таким образом, вводится понятие запроса. Информация о типе запроса (блок функция) представляет собой надстройку над фреймом и яв-

ляется служебной информацией. Для того, чтобы однозначно определить вызываемую подсистему в начале сообщения передается адрес агента.

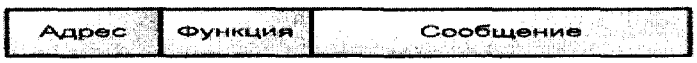


Рисунок 2 – Формат посылки

ФОРМАТ ПЕРЕДАЧИ

В соответствии с выбранным языком передачи данных должен быть выбран формат, определяющий физическую реализацию передачи данных.

Формат передачи

1. должен поддерживать возможность передачи логической структуры языка без потери смысловых составляющих;
2. должен иметь возможность задавать однозначное соответствие параметров передачи;
3. должен поддерживать простоту расширения/изменения языка при развитии системы.

В связи с этим был выбран язык XML - один из стандартных форматов передачи информации в сети интернет. По мнению автора данный язык в полной мере отвечает потребностям передачи данных и знаний между агентами МАС.

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены основные необходимые этапы на пути к реализации единого информационного пространства применительно к области АСТПП. Объединение различных систем подготовки производства в единую сеть позволит повысить уровень автоматизации принятия решений, а также улучшить качество принимаемых решений, что переводит АСТПП на качественно новый уровень.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов [Текст] / В.Д. Цветков. - Издательство «Наука и техника», 1979. - С. 264.

2. Бондаренко, Р.В. Способы создания адаптивных модулей для технологической подготовки производства [Текст] / Р.В. Бондаренко, В.В. Богданов // Научно-технический вестник. – 2006. Вып. 33. - С. 199 – 203.

3. Сисюков, А.Н. Виртуальное строковое пространство технологических данных [Текст] А.Н. Сисюков // XXXII Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. - 2006. - Ч.VI: С. 117-118.

4. Сисюков, А.Н. Концепция построения экспертной системы технологического назначения с применением методов виртуального строкового пространства [Текст] А.Н. Сисюков, А.Н. Филиппов // Научно-технический вестник, Вып. 33. - 2006. - С. 186 – 190.

5. Филиппов А. Н. Разработка и исследование методов экспертных систем в САПР ТП механической обработки [Текст] : дисс. ... канд.техн. наук / А.Н. Филиппов. - Л., 1991. - С. 152.

6. The Foundation of Intelligent Physical Agents (FIPA) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.fipa.org/

7. Minsky, M. A Framework for Representing Knowledge [Text] / M.A. Minsky // Mind Design: Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence / Ed. by J. Haugeland. Cambridge, MA: MIT Press. - 1981. - Pp. 95–128.

Куликов Дмитрий Дмитриевич
Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики
Кафедра Технологии приборостроения
Доктор технических наук, профессор
E-mail: ddkulikov@rambler.ru

Голодный Николай Викторович
Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики
Кафедра Технологии приборостроения
Аспирант
Тел: 8 950 046 04 32
E-mail: k-o-l@mail.ru

D.D. KULIKOV, N.V. GOLODNYY

CREATING A TECHNOLOGYCAL MULTI AGENT SYSTEM

Experience of development of the multiagent distributed system of technological appointment. The special attention is given to questions of integration of systems and formation of common information space.

Key words: *integration, CAPP, multiagent environment.*

BIBLIOGRAPHY

[1] System and structural modeling and automation of design of technological processes [Text] / . Publishing house «Science and equipment», 1979. - P. 264.

[2] Bondarenko, R. V. Ways of creation of adaptive modules for technological preparation of production [Text] / R.V. Bondarenko, V. V. Bogdanov // the Scientific and technical messenger, Release 33. - 2006. - Pp. 199 – 203.

[3] Sisyukov A.N. Virtual line space of technological data [Text] / A.N. Sisukov // XXXII Week of a science to SPBGPU, Materials of interuniversity scientific and technical conference, 2004. - Pp 117-118.

[4] Sisyukov, A.N. The concept of creation of expert system of technological appointment with application of methods of virtual line space [Text] / A.N. Sisyukov, A.N Filippov // the Scientific and technical messenger, Release 33. - 2006. - Pp 186-190.

[5] Filippov A. N. Development and research of methods of expert systems in SAPR TP machining [Text] : the dissertation on competition of Candidate of Technical Sciences / A.N. Filippov. - L., 1991. - P. 152.

[6] The Foundation of Intelligent Physical Agents (FIPA) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.fipa.org/

[7] Minsky, M. A Framework for Representing Knowledge [Text] / M.A. Minsky // Mind Design: Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence / Ed. by J. Haugeland. Cambridge, MA: MIT Press. - 1981. - Pp. 95–128.

Dmitry Dmitriyevich Kulikov
St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
Department of Instrument – Making Technology
Dr. Techn. Sci., Professor
E-mail: ddkulikov@ rambler.ru

Nikolay Viktorovich Golodnyy
St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
Department of Instrument – Making Technology
Post-Graduate Student
Phone: 8 950 046 04 32
E-mail: k-o-l@mail.ru

УДК 642.074.4.042.7

В.А. ГОРДОН, Э.А. КРАВЦОВА

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРА ЧАСТОТ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ С РАЗНОУРОВНЕВЫМИ ПРОДОЛЬНЫМИ РАССЛОЕНИЯМИ

В статье рассматривается методика определения собственных частот изгибных колебаний составного стержня, инициируемых внезапными расслоениями, образовавшимися по нескольким участкам параллельно и на разных уровнях по отношению к нейтральному слою в результате частичного или полного обрыва связей сдвига. Найденные частоты и формы колебаний предполагается использовать в дальнейшем при модальном анализе вынужденных колебаний стержня, когда внешние нагрузки и начальные условия представляются разложением по собственным векторам задачи для поврежденного стержня.

Ключевые слова: *составной стержень, продольные расслоения, локализация и длина расслоения, частоты собственных колебаний*

В работах [1,2,3,4] рассматривались статические и динамические задачи изгиба нагруженных балок, внезапно расслоившихся по всей длине по нейтральному слою. Было показано существенное (двух и более кратное) увеличение максимальных напряжений и деформаций при консольном и двухопорном опирании балок, нагруженных сосредоточенными и распределенными нагрузками. В настоящей работе предлагается подход, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики балки с расслоениями, образовавшимися по нескольким участкам параллельно и на разных уровнях по отношению к нейтральному слою (рисунок 1)

Рассмотрим балку длины L прямоугольного поперечного сечения площадью $A = bh$, отнесенной к декартовой системе координат xyz, начало которой расположено в центре тяжести левого торца (рисунок 1). Пусть балка на ряде участков $l_i (i = 1,2,...m)$ расслоилась. Под продольным расслоением подразумевается разрушение по определенной поверхности связей сдвига между двумя частями балки. На рисунке 1 показаны а) реальная трещина, образовавшаяся в балке, на рисунке б) поперечное сечение балки, а на рисунке в) расчетная модель балки.

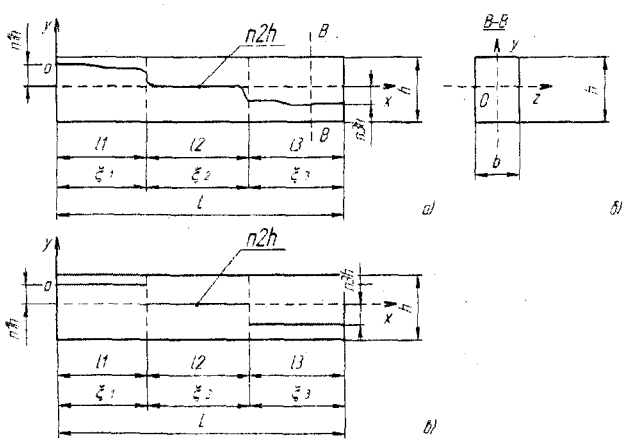


Рисунок 1- Модель балки с трещиной
а) реальная трещина в балке; б) поперечное сечение балки; в) расчетная модель балки

Согласно расчетной схеме балка моделируется сопряжением m сегментов $\Omega_i = [C_i, -C_{i-1}], C_0 = 0, C_m = L$ в виде составных (по А.Р. Ржаницыну) стержней длиной l_i с разрушенными связями сдвига и полностью сохранившимися поперечными связями. Вводятся m локальных координат $\xi_i \ (i = 1,2,..m)$. Каждый цельный сегмент рассматривается как составной стержень, две части которого определенным образом соединены достаточно жестко, чтобы считать стержень цельным при расчете на рабочие нагрузки. Напряженное состояние каждой части считается известным, если определены значения изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил в произвольном поперечном сечении. Для цельной балки и ее частей считаются справедливыми гипотезы и допущения механической теории стержней Эйлера-Бернулли. Предполагается, что связи, соединяющие обе части балки, равномерно распределены вдоль стержня, а касательные напряжения τ_{xy}, возникающие в слоях параллельных нейтральному, распределены равномерно по ширине b прямоугольного поперечного сечения

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q(x)}{2I_z}\left(\frac{h^2}{4} - y_1^2\right), \tag{1}$$

где $Q = Q(x)$ -перерезывающая сила в сечении x; $I_z = \frac{bh^3}{12}$ - осевой момент инерции поперечного сечения цельной балки; $y_1 = nh\left(n \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\right)$ -расстояние произвольного слоя от нейтрального.

На рисунке 2 изображена расчетная схема i-го сегмента балки с отсутствующими связями сдвига между верхней и нижней частями.

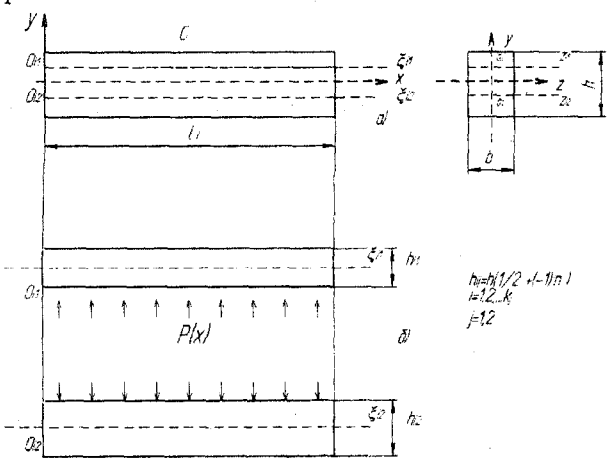


Рисунок 2 - Расчетная схема i-го сегмента балки
а) цельная балка; б) две части балки, соединенные поперечными связями

Распределенная нагрузка контактного взаимодействия частей, осуществляемого сохранившимися поперечными связями, обозначена $p(x)$. Расстояние слоя, по которому произошло расслоение, от нейтрального слоя, определяется параметром n, изменяющимся в пределах от $-\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{2}$. Высоты поперечных сечений верхней части (индекс $j = 1$) и нижней $(j = 2)$ определяются формулой

$$h_{ij} = h\left(\frac{1}{2} + (-1)^j n\right) \tag{2}$$

Уравнения свободного движения частей i-го сегмента имеют вид

$$EI_{ij}\frac{\partial^4 w_{ij}}{\partial x_{ij}^4}+\rho b h_{ij}\frac{\partial^2 w_{ij}}{\partial t^2}=(-1)^j p(x),\ (j=1,2) \tag{3}$$

где $w_{ij}=w_{ij}(x_i,t)$-прогиб j-ой части i-го сегмента; ρ- погонная плотность материала балки; $I_{ij}=\frac{bh_{ij}^3}{12}$- момент инерции поперечного сечения j-ой части i-го сегмента. Полагая справедливым равенство прогибов частей балки-сегмента

$$w_{i1}(x_i,t)=w_{i2}(x_i,t)=w_i(x_i,t) \tag{4}$$

сложим уравнения (3) и получим уравнение

$$EI_i\frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4}+\rho A\frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2}=0\ , \tag{5}$$

где $I_i=I_{i1}+I_{i2}=I_0\left(\frac{1}{4}+3n_i^2\right)$, $I_0=\frac{bh^3}{12}$.

Введем безразмерные переменные и параметры $\overline{w}_i=\frac{w_i}{L}$; $\xi_i=\frac{x_i}{L}$; $\tau=\omega_0 t$; $\omega_0=\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$;

Тогда уравнение (5) принимает вид

$$\frac{\partial^4\overline{w}_i}{\partial\xi_i^4}+r_i^4\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\tau^2}=0, \tag{6}$$

где $r_i^4=\frac{I_0}{I_i}=\frac{1}{\frac{1}{4}+3n_i^2}$.

Полагая собственные колебания гармоническими, разделим переменные в уравнении (6) с помощью представления

$$\overline{w}_i=W_i(\xi)e^{i\overline{\omega}\tau}\ , \tag{7}$$

где $\overline{\omega}=\frac{\omega}{\omega_0}$- безразмерная собственная частота изгибных колебаний (парциальная собственная частота i-го сегмента). Подставляя (7) в (6), получим дифференциальное уравнение для форм собственных изгибных колебаний

$$W_i^{IV}-k_i^4W_i=0\text{, где } k_i=r_ik \tag{8}$$

$k^4=\frac{\omega^2\rho AL^4}{EI}$-(цельный стержень), $k=\sqrt{\frac{\omega}{RC}}$- волновое число, $C=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $R=\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{I}{A}}$

Корнями дисперсионного уравнения являются числа $k_i,-k_i,ik_i,-ik_i$ и общее решение уравнения (8) принимает вид

$$W_i=D_{i1}\cos k_i\xi_i+D_{i2}\sin k_i\xi_i+D_{i3}chk_i\xi_i+D_{i4}shk_i\xi_i \tag{9а}$$

Повороты поперечных сечений i-го сегмента

$$\Theta_i=W_i'=k\left(-D_{i1}\sin k_i\xi_i+D_{i2}\cos k_i\xi_i+D_{i3}shk_i\xi_i+D_{i4}chk_i\xi_i\right) \tag{9б}$$

Изгибающий момент на i-ом сегменте

$$\frac{M_i}{EI_i} = W_i'' = k^2\left(-D_{i1}\cos k_i\xi_i - D_{i2}\sin k_i\xi_i + D_{i3}chk_i\xi_i + D_{i4}shk_i\xi\right) \qquad (9в)$$

Поперечная сила на i-ом сегменте

$$\frac{Q_i}{EI_i} = W_i''' = k^3\left(D_{i1}\sin k_i\xi_i - D_{i2}\cos k_i\xi_i + D_{i3}shk_i\xi_i + D_{i4}chk_i\xi_i\right) \qquad (9г)$$

Запишем зависимость (9) в матричной форме, введя следующие векторы и матрицы: $\overline{Y}_i = \left(W_i, W_i', W_i'', W_i'''\right)^T$ - вектор состояния в произвольном сечении ξ; $\overline{D}_i = (D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}, D_{i4})^T$ - вектор постоянных интегрирования, матрица U_i

$$U_i(\xi_i,\omega) = \begin{pmatrix} -\cos k_i\xi_i & \sin k_i\xi_i & chk_i\xi_i & shk_i\xi_i \\ -k_i\sin k_i\xi_i & k_i\cos k_i\xi_i & k_i shk_i\xi_i & k_i chk_i\xi_i \\ -k_i^2\cos k_i\xi_i & -k_i^2\sin k_i\xi_i & k_i^2 chk_i\xi_i & k_i^2 shk_i\xi_i \\ k_i^3\sin k_i\xi_i & -k_i^3\cos k_i\xi_i & k_i^3 shk_i\xi_i & k_i^3 chk_i\xi_i \end{pmatrix}$$

Тогда

$$\overline{Y}_i = U_i(\xi_i,\omega)\overline{D}_i \qquad (10)$$

Обозначим $\overline{Y}_{i0}$ вектор состояния в начале балки. Выразим его через начальные параметры $\overline{Y}_{i0} = \left(W_{i0}, W_{i0}', W_{i0}'', W_{i0}'''\right)$.

Тогда постоянные интегрирования $D_{in}\ (n = 1 \div 4)$ выражаются через начальные параметры. Из уравнения (10) следует при $\xi = 0$

$$Y_{i0} = B_i\overline{D}_i\ , \qquad (11)$$

где B - невырожденная $\left(\det B = 4k^6\right)$ матрица $B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_i & 0 & k \\ -k_i^2 & 0 & k_i^2 & 0 \\ 0 & -k_i^3 & 0 & k_i^3 \end{pmatrix}$,

имеющая обратную

$$B_i^{-1} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{k_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_i} & 0 & -\frac{1}{k_i^3} \\ 1 & 0 & \frac{1}{k_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_i} & 0 & \frac{1}{k_i^3} \end{pmatrix}$$

Умножая уравнение (11) на матрицу B_i^{-1} слева, получим

$$\overline{D}_i = B_i^{-1}\overline{Y}_{i0} \qquad (12)$$

и подставляя (12) в (10) выразим вектор состояния $\overline{Y}_i$ через начальные параметры $\overline{Y}_{i0}$ осредством матрицы влияния $V_i(\xi_i)$

$$\overline{Y}_i = V_i(\xi_i)\overline{Y}_{i0}\ , \qquad (13)$$

где матрица $V_i(\xi_i)$ имеет вид

$$V_i(\xi_i)=\begin{pmatrix} K_4(k_i\xi_i) & K_3(k_i\xi_i) & K_2(k_i\xi_i) & K_1(k_i\xi_i) \\ k_i^4K_1(k_i\xi_i) & K_4(k_i\xi_i) & K_3(k_i\xi_i) & K_2(k_i\xi_i) \\ k_i^4K_2(k_i\xi_i) & k_i^4K_1(k_i\xi_i) & K_4(k_i\xi_i) & K_3(k_i\xi_i) \\ k_i^4K_3(k_i\xi_i) & k_i^4K_2(k_i\xi_i) & k_i^4K_1(k_i\xi_i) & K_4(k_i\xi_i) \end{pmatrix},$$

где $K_j(k\xi) \quad (j=1\div 4)$ - функции Крылова

$$K_{1i}=\frac{shk_i\xi_i-\sin k_i\xi_i}{2k_i^3},\quad K_2=\frac{chk_i\xi_i-\cos k_i\xi_i}{2k_i^2},\quad K_3=\frac{shk_i\xi_i+\sin k_i\xi_i}{2k_i},\ K_4=\frac{chk_i\xi_i+\cos k_i\xi_i}{2}.$$

Обозначая $\eta_i=k_i\bar{l}_i$, запишем вектор состояния для конца i-го сегмента при $\xi_i=\bar{l}_i$, где $\bar{l}_i=\dfrac{l_i}{L}$

$$\bar{Y}_{i\bar{l}_i}=V(\eta_i)\bar{Y}_{i0}, \tag{14}$$

здесь $V(\eta_i)$ - матрица влияния начального сечения $\xi=0$ на концевое сечение i-го сегмента.

Условия сопряжения двух соседних (i и $i+1$-го) сегментов имеют вид

$$\begin{aligned} W_i(\bar{l}_i)&=W_{i+1}(0)\\ W_i'(\bar{l}_i)&=W_{i+1}'(0)\\ I_1W_i''(\bar{l}_i)&=I_2W_{i+1}''(0)\\ I_1W_i'''(\bar{l}_i)&=I_2W_{i+1}'''(0) \end{aligned} \tag{15}$$

Для двух сегментов Ω_1 и Ω_m формулируются дополнительные ограничения.

Например, для балки левый конец которой защемлен, а правый шарнирно оперт накладываются условия

$$W_1(0)=W_1'(0)=W_m(\bar{l}_m)=W_m''(\bar{l}_m)=0, \tag{16}$$

Уравнения (15) сопряжения сегментов (i и $i+1$-го) можно представить в матричной форме $T_i\bar{Y}_{i0}=T_{i+1}\bar{Y}_{i+10}$, где

$$\underset{4\times4}{T_i}=\begin{pmatrix} K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) & K_2(\eta_i) & K_1(\eta_i) \\ k_i^4K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) & K_2(\eta_i) \\ k_i^4K_2(\eta_i) & k_i^4K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) \\ k_i^4K_3(\eta_i) & k_i^4K_2(\eta_i) & k_i^4K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) \end{pmatrix}=V(\eta_i)$$

$\underset{4\times4}{T_{i+1}}=\underset{4\times4}{E}$, т.е. $V_{i\bar{l}_i}$ вектор состояния для конца ***i***-го сегмента, является вектором начальных параметров для *(i+1)* –го сегмента

$$\bar{Y}_{i\bar{l}_i}=\bar{Y}_{i+10}=V(\eta_i)\bar{Y}_{i0} \tag{17}$$

Соотношение (17) дает связь между константами (начальными параметрами) *(i+1)*- го и *i*-го сегментов. Вектор состояния в конце m -го сегмента, т.е. в конце стержня $\xi_m=\bar{l}_m$

$\bar{Y}_{m\bar{l}_m}=V(\eta_m)\bar{Y}_{m0}=V(\eta_m)V(\eta_{m-1})\ldots V(\eta_1)\bar{Y}_{10}=S_{m\bar{l}_m}\bar{Y}_{10}$, где

$S_{m\bar{l}_m}=\prod_{i=1}^{m}V(\eta_i)$- матрица влияния начального сечения на конечное $\xi_1=0$, $\xi_m=\bar{l}_m$.

Представим вектор состояния совокупностью блоков:

1) $\bar{Y}^{(C)}$- включает кинематические составляющие $\bar{Y}^{(C)}=(W,W')$

2) $\bar{Y}^{(F)}$- включает силовые параметры $\bar{Y}^{(F)}=(W'',W''')$.

Тогда матрица влияния начального узла (сечения) на конечный становится клеточной, включающей 4 блока размера 4×4.

$$Y_{m\bar{l}_m}=\begin{pmatrix}\bar{Y}^{(c)}_{m\bar{l}_m}\\ \bar{Y}^{(F)}_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}S^{(cc)}_{m\bar{l}_m} & S^{(cF)}_{m\bar{l}_m}\\ S^{(Fc)}_{m\bar{l}_m} & S^{(FF)}_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar{Y}^{(c)}_{10}\\ \bar{Y}^{(F)}_{10}\end{pmatrix}, \tag{18}$$

где обозначено $\bar{Y}^{(c)}_{m\bar{l}_m}=\begin{pmatrix}W_{m\bar{l}_m}\\ W'_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}$, $\bar{Y}^{(F)}_{m\bar{l}_m}=\begin{pmatrix}W''_{m\bar{l}_m}\\ W'''_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}$, $\bar{Y}^{(c)}_{10}=\begin{pmatrix}W_{10}\\ W'_{10}\end{pmatrix}$, $\bar{Y}^{(F)}_{10}=\begin{pmatrix}W''_{10}\\ W'''_{10}\end{pmatrix}$,

$$S^{(CC)}=\begin{pmatrix}S_{11} & S_{12}\\ S_{21} & S_{22}\end{pmatrix}, S^{(CF)}=\begin{pmatrix}S_{13} & S_{14}\\ S_{23} & S_{24}\end{pmatrix}, S^{(FC)}=\begin{pmatrix}S_{31} & S_{32}\\ S_{41} & S_{42}\end{pmatrix}, S^{(FF)}=\begin{pmatrix}S_{33} & S_{34}\\ S_{43} & S_{44}\end{pmatrix}$$

Здесь S_{pq} - элементы матрицы $S_{n\bar{l}_n}=\prod_{i=1}^{n}V(\eta_i)$, $p,q=1,2,3,4$; p - количество строк в матрице; q - количество столбцов в матрице $S_{m\bar{l}_m}$.

Характеристики начального сечения выражаются через кинематические характеристики концевого сечения

$$\bar{Y}^{(F)}_{10}=\left[S^{(CF)}\right]^{-1}\left(\bar{Y}^{(C)}_{m\bar{l}m}-S^{(CC)}\bar{Y}^{(c)}_{10}\right) \tag{19}$$

Введем вектор перемещений концевых сечений (начального $\xi_1=0$ и конечного $\xi_m=\bar{l}_m$) $\bar{U}=\left(W_{10}W'_{10}W_{m\bar{l}_m}W'_{m\bar{l}_m}\right)$ и вектор сил (включая моменты) $\bar{F}=\left(W_{10}{}''W'''_{10}W''_{m\bar{l}_m}W'''_{m\bar{l}_m}\right)$. Связь между ними находим, используя соотношения (18) и (19)

$$\bar{F}(\omega)=K(\omega)U(\omega) \tag{20}$$

Из второго уравнения (18) находим (с учетом (19))

$$\bar{Y}^{(F)}_{m\bar{l}_m}=\left(S^{(FC)}-S^{(FF)}\left[S^{(CF)}\right]^{-1}S^{(CC)}\right)\bar{Y}^{(C)}_{10}+S^{(FF)}\left[S^{(CF)}\right]^{-1}\bar{Y}^{(C)}_{m\bar{l}_m} \tag{21}$$

Объединяя (19) и (21), получим

$$\begin{pmatrix}\bar{Y}^{(F)}_{10}\\ \bar{Y}^{(F)}_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-\left[S^{(CF)}\right]^{-1}S^{(CC)} & \left[S^{(CF)}\right]^{-1}\\ S^{(FC)}-S^{(FF)}\left[S^{(CF)}\right]^{-1}S^{(CC)} & S^{(FF)}\left[S^{(CF)}\right]^{-1}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\bar{Y}^{(C)}_{10}\\ \bar{Y}^{(C)}_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}$$ или в развернутом виде

$$\begin{pmatrix}W''_{10}\\ W'''_{10}\\ W''_{m\bar{l}_m}\\ W'''_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}=\frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix}T_{11} & & T_{12}\\ & T_{4\times 4} & \\ T_{21} & & T_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}W_{10}\\ W'_{10}\\ W_{m\bar{l}_m}\\ W'_{m\bar{l}_m}\end{pmatrix}$$, где $\left[S^{(CF)}\right]^{-1}=\frac{1}{S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23}}\begin{pmatrix}S_{24} & -S_{14}\\ -S_{23} & S_{13}\end{pmatrix}=T$

$$a_{11}=(S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23})S_{31}+(S_{23}S_{34}-S_{24}S_{33})S_{11}+(S_{14}S_{33}-S_{13}S_{34})S_{21}$$
$$a_{12}=(S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23})S_{32}+(S_{23}S_{34}-S_{24}S_{33})S_{12}+(S_{14}S_{33}-S_{13}S_{34})S_{22}$$
$$a_{21}=(S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23})S_{41}+(S_{23}S_{44}-S_{24}S_{43})S_{11}+(S_{14}S_{43}-S_{13}S_{44})S_{21}$$
$$a_{22}=(S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23})S_{42}+(S_{23}S_{44}-S_{24}S_{43})S_{21}+(S_{14}S_{43}-S_{13}S_{44})S_{22}$$

$\Delta=S_{13}S_{24}-S_{14}S_{23}$, тогда блочная матрица $T_{4\times 4}=\begin{pmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{pmatrix}$ раскрывается следующим образом

$$T_{11}=\begin{pmatrix}b_{11} & b_{12}\\ b_{21} & b_{22}\end{pmatrix};$$

$b_{11}=S_{14}S_{21}-S_{11}S_{24}$; $b_{12}=S_{14}S_{22}-S_{12}S_{24}$; $b_{21}=S_{12}S_{23}-S_{13}S_{22}$;

$b_{22} = S_{12}S_{22} - S_{13}S_{22}$;

$T_{12} = \begin{pmatrix} S_{24} & -S_{14} \\ -S_{23} & S_{13} \end{pmatrix}$; $T_{21} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$; $T_{22} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$, где

$c_{11} = S_{24}S_{33} - S_{23}S_{34}$; $c_{12} = S_{13}S_{34} - S_{14}S_{33}$; $c_{21} = S_{24}S_{43} - S_{23}S_{44}$; $c_{22} = S_{13}S_{44} - S_{14}S_{43}$;

$$T = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & S_{24} & -S_{14} \\ b_{21} & b_{22} & -S_{23} & S_{13} \\ a_{11} & a_{12} & c_{11} & c_{12} \\ a_{21} & a_{22} & c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$$

Приравнивая нулю определитель матрицы T, получим частотное уравнение для балки, изображенной на рисунке 1, состоящей из m участков с продольными расслоениями

$$|T| = 0 \qquad (22)$$

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для балки, состоящей из трех участков m = 3 с продольными расслоениями на уровнях $(n_1 = 0{,}4)$, $(n_2 = 0)$, $(n_3 = -0{,}4)$ при одинаковых длинах этих участков были получены пять низших частот $\omega_1 = 15{,}321$, $\omega_2 = 49{,}853$, $\omega_3 = 104.13$, $\omega_4 = 178{,}149$, $\omega_5 = 271{,}909$.. Эти частоты являются корнями частотного уравнения (21), записанного для балки, состоящей из трех участков $(m = 3)$. Условия опирания балки, соответствуют формулам (16).

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

На рисунке 3 показаны частные случаи для балки, состоящей из трех участков m = 3 с продольными расслоениями: а) балка без трещины (цельная балка); б) на I и IIIучастках трещина отсутствует, а на II участке расслоение по нейтральному слою на всю длину участка; в) на II и III участках трещина отсутствует, а на I участке расслоение по всему участку по нейтральному слою.

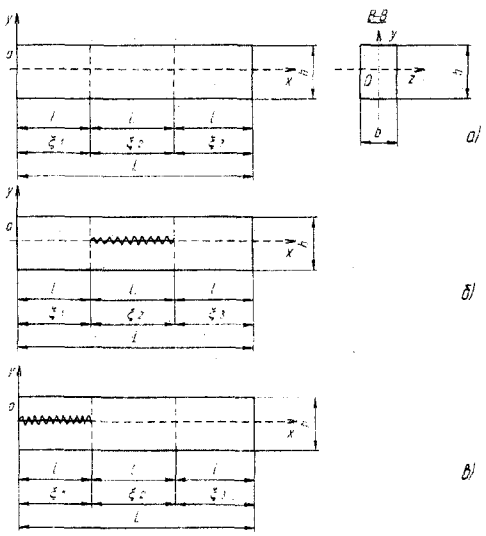


Рисунок 3-Частные случаи для балки с продольными расслоениями

а) цельная балка; б) на II участке расслоение по нейтральному слою на всю длину участка; в) на I участке расслоение по всему участку по нейтральному слою

В случае цельной балки были получены пять низших частот $\omega_1 = 15{,}787$, $\omega_2 = 50{,}392$, $\omega_3 = 104.698$, $\omega_4 = 178{,}732$, $\omega_5 = 272{,}5$. Эти частоты являются корнями частотного уравнения (21), записанного для балки, состоящей из трех участков

$(m=3)$. Условия опирания балки, соответствуют формулам (16). Эти значения соответствуют справочным данным.

В случае когда, на I и III участках трещина отсутствует, а на II участке расслоение по нейтральному слою на всю длину участка, были получены пять низших частот $\omega_1 = 15{,}665$, $\omega_2 = 50{,}25$, $\omega_3 = 104{,}548$, $\omega_4 = 178{,}578$, $\omega_5 = 272{,}344$.Эти значения совпадают с частотами, полученными ранее в работе[2] при $C = 0{,}667$, $\xi_1 = \frac{1}{3}$, $\xi_2 = \frac{2}{3}$.

В случае, когда на II и III участках трещина отсутствует, а на I участке расслоение по всему участку по нейтральному слою, были получены пять низших частот $\omega_1 = 15{,}335$, $\omega_2 = 49{,}869$, $\omega_3 = 104{,}147$, $\omega_4 = 178{,}167$, $\omega_5 = 271{,}927$. Эти значения совпадают с частотами, полученными ранее в работе[2] при $C = -0{,}222$, $\xi_1 = 0$, $\xi_2 = \frac{1}{3}$.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон, В.А. Перераспределение напряжений в нагруженной составной балке при деградации связей сдвига [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительная механика и расчет сооружений - М.: ФГУП НИЦ «Строительство». – 2010. - №4. - С. 2-6.

2. Гордон, В.А. Влияние продольного расслоения составного стержня на частоты собственных изгибных колебаний [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительная механика и расчет сооружений - М.: ФГУП НИЦ «Строительство». - 2011. - №1. - С. 19-24.

3. Павлова, Т.А. Развитие метода расчета строительных конструкций на живучесть при внезапных структурных изменениях [Текст] : дисс. … канд. техн. наук: 05.23.17. - Орел. - 2006. – 175 с.

4. Гордон, В.А. Влияние прогрессирующего расслоения на напряженное состояние составного стержня [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Вестник отделения строительных наук РААСН. - Вып.5. - М.: 2011. - С. 60-64.

Гордон Владимир Александрович
Госуниверситет - УНПК,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»,
г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7(4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

Кравцова Эльвира Александровна
Госуниверситет - УНПК, старший преподаватель,
г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7(4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

V.A. GORDON, E. A. KRAVTSOVA

METHOD FOR DETERMINING THE SPECTRUM BENDING FREQUENCY BEAM WITH MULTILEVEL LONGITUDINAL BUNDLE

In the article the method of determining the natural frequencies of flexural vibrations of a composite rod, driven by sudden bundles formed in several areas simultaneously and at different levels with respect to the neutral layer as a result of partial or complete break ties shift. Found the frequency and mode shapes to be used later in the modal analysis of forced vibrations of the rod when the external loads and initial conditions are represented by eigenvector decomposition problem for the damaged rod.

Key words: *composite rod longitudinal bundle, location and length of the bundle, the frequency of natural oscillations*

BIBLIOGRAPHY

[1] Gordon, V. The redistribution of stresses in the composite beam loaded at the shear degradation of the bonds [Text] / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Construction mechanics and calculation of structures-M.: Federal State Unitary Enterprise Research Center "Construction". – 2010. - № 4. - Pp. 2-6.

[2] Gordon, V. The influence of the longitudinal bundle of composite rods for the frequencies of flexural vibrations [Text] / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Construction mechanics and calculation of structures - M.: Federal State Unitary Enterprise Research Center "Construction". - 2011. - Number 1. - Pp. 19-24.

[3] Pavlova, T. Development of the method of calculation of building structures on the survivability of sudden structural changes in the [Text] : diss. ... Candidate. Technical. Sciences: 05.23.17. - Orel. - 2006. – 175 p.

[4] Gordon, V. The influence of the progressive bundle on the stress state of composite rod [Text] / V.A. Gordon, E.A. Kravtsova // Journal of Civil Engineering Department RAASN. - Issue 5. - M.: 2011. - Pp. 60-64.

Vladimir Alexsandrovich. Gordon
State University - UNPK,
Doctor of Technical Sciences, professor, head of "Higher Mathematics"
Orel, ul. Naugorskoe Highway, 29
Tel.: 7 (4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

Elvira Alexsandrovna. Kravtsova
State University - UNPK,
Senior Lecturer,
Orel, ul. Naugorskoe Highway, 29
Tel.: 7 (4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

УДК 620.179.1.082.7

Г.И. УТКИН, В.В. МАРКОВ

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ РАЗЪЁМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

Контактные пары разъёмных электрических соединителей, по сравнению с соединителями других типов, имеют особенности процесса трения. Это обстоятельство необходимо учесть при моделировании процесса трения и износа деталей контактной пары за счёт задания граничных условий, ограничений и допущений.

Ключевые слова: *трение; трибология; фрикционный контакт; зона трения; разъёмный электрический соединитель; контактная пара; износ; фактическая площадь контакта; сила сочленения; сила расчленения*

Процесс трения рабочих поверхностей деталей контактных пар разъёмных электрических соединителей является одной из основных причин их изнашивания. Поэтому при моделировании процессов изнашивая поверхностей необходимо учитывать составляющую, обусловленную трением, а в качестве начальных условий синтезируемой модели следует задавать ограничения и допущения, учитывающие особенности процесса трения в разъёмах.

Процессы трения являются объектом научных исследований на протяжении нескольких столетий. Фундаментальные законы трения сформулированы Леонардо да Винчи более пятисот лет назад. В настоящее время существует достаточно полная теория трения твёрдых тел, общие сведения о которой можно получить в различных трудах, например, в работе [1].

Процессы трения, протекающие на поверхностях деталей электрических соединителей, широко отражены в научной литературе [2]. В настоящее время теория трения шероховатых поверхностей деталей соединителей основана на следующих положениях [2-4]:

1) рабочие поверхности деталей контактных пар соединителей в процессе эксплуатации могут испытывать два вида трения – трение покоя и трение скольжения. В свою очередь, трение скольжения включает в себя адгезионную (молекулярную) и деформационную (механическую) составляющие;

2) центральным понятием в теории трения является фактическая площадь контакта (ФПК или A_r), так как она, в совокупности с нормальной силой, определяет силу трения контактирующих поверхностей;

3) контакт рабочих поверхностей деталей контактных пар соединителей является упруго-пластическим, то есть учёта только одной упругой составляющей контакта для описания деформации поверхностей недостаточно;

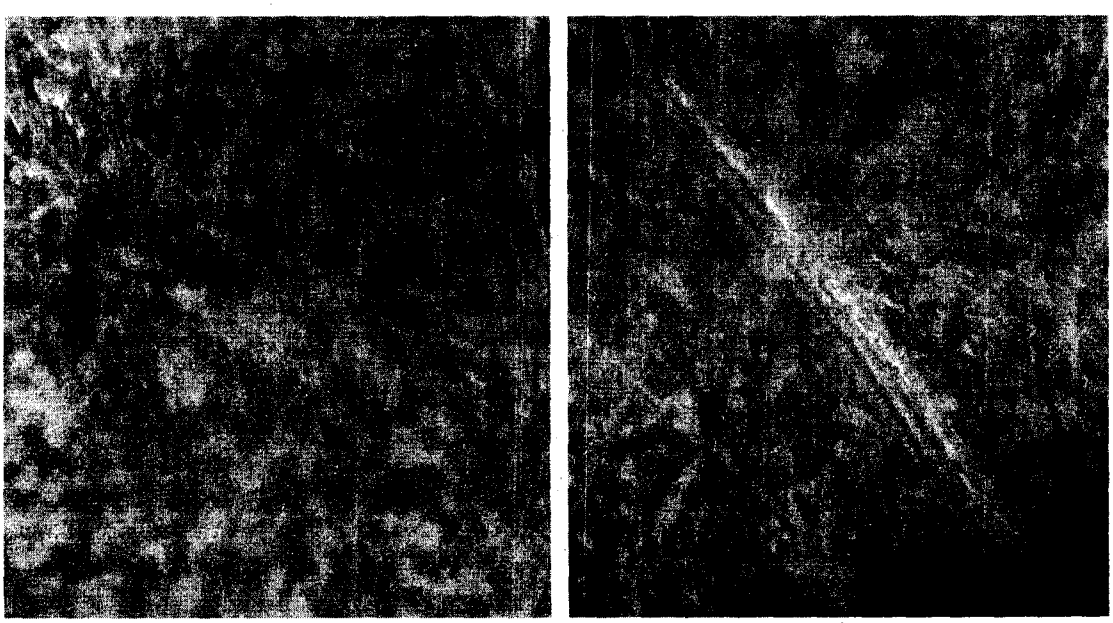
4) в качестве модели единичной неровности рабочей поверхности детали электрического соединителя применяется конус;

5) трение в контакте является одним из основных источников избыточной температуры поверхностей деталей контактных пар соединителей.

Трение (сопротивление движению) поверхностей деталей контактных пар разъёмных электрических соединителей является одним из основных эффектов, благодаря которому явления, протекающие в разъёмах, становятся уникальными, не имеющими аналогов ни в каких других трибосопряжениях.

Наиболее глубоко в теоретическом и экспериментальном отношении феномен трения изучен для опор качения и скольжения машин. Однако, известные модели трения деталей опор машин не могут быть использованы для описания трения в разъёмах без введения ряда дополнительных ограничений и допущений. Поверхности деталей опор качения или скольжения в машинах выполняются из материалов с достаточно хорошими механическими свойствами, поэтому контакт в них, как правило, считается упругим. На поверхностях деталей контактной пары разъёма нанесено мягкое и «рыхлое» серебреное покрытие, нанесённое гальваническим способом. Поэтому контакт в них должен рассматриваться, как упруго-пластический или пластический. Это подтверждается наблюдением за изменениями топографии поверхностей деталей, изготовленных из чёрных и цветных металлов.

На рисунке 1 показаны фотографии поверхности штыря контактной пары до (рисунок 1, а) и после (рисунок 1, б) одного замыкания. На фотографии рисунка 1, б отчётливо виден след износа поверхности штыря контактной пары после *одного* замыкания (сочленения).



а) *б)*

Рисунок 1 - Увеличенное изображение посеребрённой поверхности штыря контактной пары разъёма до (а) и после (б) одного замыкания (фотографии сделаны с помощью исследовательского микроскопа AKSTOCKOP2 MAT в учебно-научной лаборатории ЦКП Госуниверситета-УНПК)

На рисунках 2 и 3 показаны результаты многократных измерений параметров шероховатости поверхностей, изготовленных из стальных деталей, медных деталей, и деталей с серебряным покрытием поверхностей. При этом на рисунке 2 показаны результаты измерения параметра шероховатости *Rmax* (наибольшая высота неровностей профиля в пределах базовой длины), а на рисунке 3 – результаты измерения параметра шероховатости S_m (средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины).

Для измерения параметров шероховатости использован профилограф-профилометр «АБРИС-ПМ7.2», который установлен в Центре коллективного пользования измерительным и испытательным оборудованием Госуниверситета-УНПК. Профилометр-профилограф предназначен для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных и приборостроительных предприятий, а также в полевых условиях, и для измерения шероховатости шаров. Измерение параметров шероховатости поверхности производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными стандартом ГОСТ 2789-73.

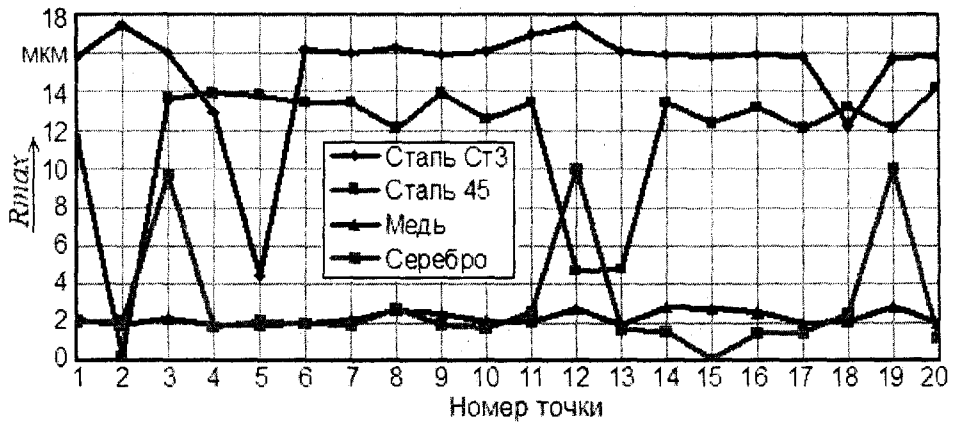


Рисунок 2 - Результаты многократных измерений параметра шероховатости Rmax для деталей, изготовленных из цветных и чёрных металлов

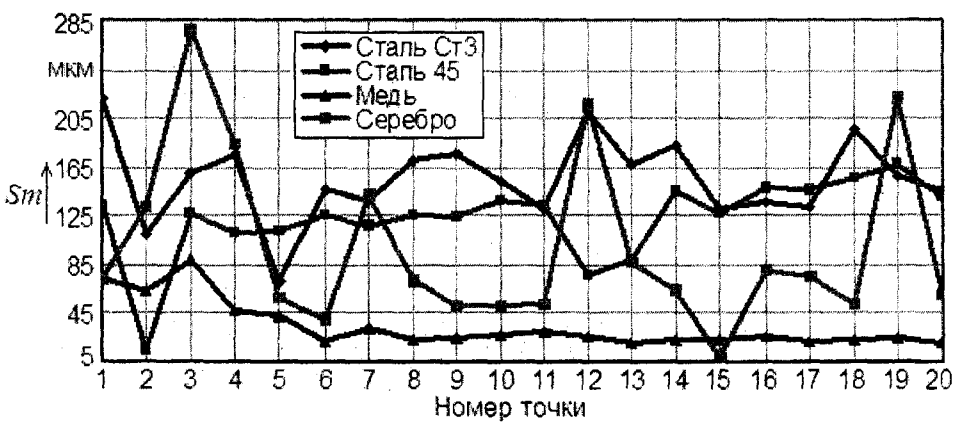


Рисунок 3 - Результаты многократных измерений параметра шероховатости S_m для деталей, изготовленных из цветных и чёрных металлов

Результаты измерения параметров шероховатости подтверждают, что характер изменения профиля поверхности детали с серебряным покрытием в процессе её контактирования с другой поверхностью существенно отличается не только от характера изменения профиля поверхностей деталей из сталей различного качества (качественная горячекатаная сталь 45 и низкоуглеродистая сталь обыкновенного качества Ст 3), для которых контакт, как правило,

считается *упругим*, но и от характера изменения профиля поверхности медной детали, для которой контакт обычно признаётся *пластическим*. Наиболее отчётливо особые свойства контактирования посеребренных деталей видны на рисунке 2: «всплески» значений параметра шероховатости R_{max} соответствуют срезанию участка серебряного покрытия (рисунок 2, *б*) и его попаданию под измерительный наконечник профилометра-профилографа.

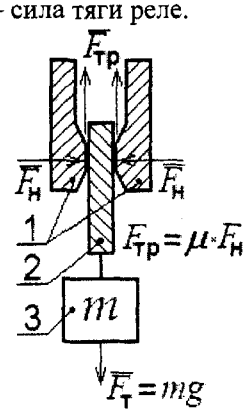
Таким образом, одним из отличительных свойств процесса трения поверхностей деталей контактной пары разъёма является *упруго-пластический контакт поверхностей* и *высокая вероятность разрушения серебряного покрытия* в результате перемещения поверхностей относительно друг друга.

Трение в опорах машин осуществляется, как правило, в условиях наличия смазочного материала, а контактирующие поверхности непрерывно перемещаются относительно друг друга. В разъёмах трение происходит в отсутствие смазочного материала, а после замыкания чистые металлические поверхности непосредственно касаются друг друга (без этого невозможен электрический контакт) и долгое время остаются неподвижными (без этого невозможно обеспечить стабильность электрических параметров контакта). Это обуславливает высокую вероятность возникновения микросварки, схватывания и, как следствие, локальных дефектов на поверхностях деталей контактных пар. В опорах машин основные трибологические явления рассматриваются не с начала работы машины, а после окончания так называемого «явления приработки». При анализе особенностей функционирования разъёмных соединителей необходимо учитывать трибологические явления, происходящие в первые моменты замыкания или размыкания контактных пар.

Существенной особенностью процесса трения в разъёмных электрических соединителях является *функциональное назначение силы трения*, возникающей между рабочими поверхностями контактных пар.

Сила трения, возникающая между деталями контактной пары разъёма, фиксирует детали относительно друг друга и препятствует непреднамеренному размыканию разъёмного соединителя. В соединителях других типов для фиксации контактов используются силы другой природы. В неподвижных неразборных соединителях – это атомные силы между соединяемыми поверхностями. В неподвижных разборных соединителях – сила, создаваемая крепёжными элементами. В скользящих контактах электрических машин – сила упругости пружины токосъёмника. В разрывных контактах релейных устройств – сила тяги реле.

Значение силы трения в контактной паре разъёма определяет стабильность электрических параметров контакта, так как сила трения служит для предотвращения непроизвольного перемещения рабочих поверхностей деталей контактной пары относительно друг друга, приводящего к изменению значения переходного сопротивления контакта, разрыву электрического сопротивления в разъёме и повышения интенсивности электрического изнашивания поверхностей из-за возникновения электрических искр и дуг. При этом значение силы трения в контактной паре разъёма даже не нормируется нормативными документами – для них задаётся только сила сочленения или расчленения гнезда и штыря контактной пары, хотя стандартная схема измерения этой силы составлена так, что при её реализации оценивается именно сила трения (рисунок 4).



1 – гнездо контактной пары;
2 – контрольный штырь-калибр;
3 – груз массой m

Рисунок 4 - Схема измерения силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары

Измерение силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары производится по следующей методике. Контрольный штырь-калибр соединяется с грузом массой m и сочленяется с гнездом контролируемой контактной пары.

Если сила тяжести, развиваемая грузом, меньше силы трения в контактной паре, то штырь-калибр удерживается в гнезде контактной пары. Если же сила тяжести превышает силу трения, то контрольный штырь-калибр выпадает из гнезда и происходит расчленение контактной пары.

Сила сочленения и расчленения определяется и нормируется, исходя из значения массы груза, соответственно, удерживаемого и выпадающего из гнезда контактной пары. Например, для одной контактной пары разъёма типа СНП-260 допустимое значение силы сочленения задано, как 20 граммов (0,2 Н), а допустимое значение силы расчленения, как 60 граммов (0,6 Н). Кроме того, контрольный штырь-калибр, как правило, изготавливается из углеродистых сталей, и трение происходит в паре серебро-сталь, а не в паре серебро-серебро, что имеет место при эксплуатации разъёма. Таким образом, можно сделать вывод, что стандартная методика испытаний разъёмов не позволяет определить силу трения между поверхностями деталей контактной пары.

В разъёмах сила трения покоя удерживает штырь и гнездо от случайного размыкания, следовательно, она должна достигать достаточно больших значений. Кроме того, основной материал деталей контактной пары разъёма (обычно медь или латунь) покрыт слоем мягкого и пластичного материала (обычно серебро или его сплавы). Поэтому сила трения в разъёмных соединителях способна привести к существенному износу рабочих поверхностей деталей контактной пары. Таким образом, сила трения между рабочими поверхностями деталей контактной пары необходима для обеспечения стабильности электрических параметров контакта, является одной из основных причин механического износа поверхностей деталей контактной пары, а стандартные методы оценки её действительных значений, адекватные реальным условиям функционирования разъёмов, отсутствуют.

ВЫВОДЫ

Основными особенностями процесса трения рабочих поверхностей деталей контактной пары разъёма являются: упруго-пластический характер контакта поверхностей; высокая интенсивность износа относительно тонкого слоя электропроводного покрытия поверхностей обеих деталей при сочленении и расчленении контактной пары; необходимость поддержания силы трения, достаточной для обеспечения стабильности электрических параметров контакта и являющейся одной из основных причин механического износа поверхностей деталей контактной пары, значение которой не может быть оценено стандартными методами испытаний разъёмов; сложная структура фактической площади контакта, включающей в себя несколько площадок контакта различных размеров, вследствие возможной волнистости контактирующих поверхностей и линейного пятна контакта; фрикционное взаимодействие чистых металлических поверхностей, которые после сочленения длительное время могут оставаться неподвижными, что повышает вероятность диффузионного взаимодействия и «схватывания» их отдельных областей.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение и износ фрикционных материалов [Текст] / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1977. – 136 с.

2. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.

3. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология [Текст] / Н.Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.

4. Лоповок, Т.С. Волнистость поверхности и ее применение [Текст] / Т.С. Лоповок. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 184 с.

Уткин Георгий Игоревич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»,
г. Орёл, Россия
аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
телефон (4862)41-98-76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Марков Владимир Владимирович
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»,
г. Орёл, Россия
доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н., доцент
телефон (4862)41-98-76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

G.I. UTKIN, V.V. MARKOV

PECULIARITIES PROCESS OF FRICTION THE WORKING SURFACES OF ELEMENTS THE CONTACT PAIR OF PREFABRICATED ELECTRICAL CONNECTOR

The contact pair of prefabricated electrical connectors, on the comparison the connectors of other types, is has the peculiarities the process of friction. This circumstance is necessary account by modeling the process of friction and wears the elements of contact pair behind at the expense of task border conditions, limitations and assumptions.

Key words: *friction; tribology; friction contact; zone of friction; prefabricated electrical connector; contact pair; wear; fact area of contact; strength of circuit; strength of disjoin*

BIBLIOGRAPHY

[1] Friction and wear the friction materials [Text] / Red. A.V. Chichinadze. – M.: Sciense, 1977. – 136 p.

[2] Mishkin, N.K. Tribology. The principles and supplements [Text] / N.K. Mishkin, M.I. Petrokovec. – Gomel: National Academy of Belarus, 2002. – 310 p.

[3] Demkin, N.B. Theory of contact the reality surfaces and tribology [Text] / N.B. Demkin // Friction and Wear. – 1995. – V. 16. –№ 6. – P. 1003-1024.

[4] Lopovok, T.S. Waving surface and she application [Text] / T.S. Lopovok. – M.: Publishing House of Standards, 1973. – 184 p.

Utkin George Igorevich
State-University, Oryol, Russia
post-graduate student of sub-faculty «Device-building, metrology and certification»
telephone (4862)41-98-76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Markov Vladimir Vladimirovich
State-University, Oryol, Russia
reader of sub-faculty «Device-building, metrology and certification», Ph.D, reader
telephone (4862)41-98-76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

УДК 664.653/654:620.18

В. П. КОРЯЧКИН, М.А. НИКОЛАЕВА,
Т.В. МАТВЕЕВА, Н.П. САПРОНОВА

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕКЕРНОГО ТЕСТА ПОВЫШЕННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ

В статье приведены результаты реометрии образцов крекерного теста с овсяной мукой, определены оптимальные дозировки овсяной муки взамен пшеничной при производстве крекеров.

Ключевые слова: *реометрия, крекерное тесто, овсяная мука, производство крекеров.*

Реологические свойства теста являются важными технологическими характеристиками данного полуфабриката, влияющими на работу тесторазделочного оборудования и определяющими качество готовой продукции. В данной работе рассмотрена возможность применения овсяной муки при приготовлении крекерного теста. Зерно овса богато витамином B_1. В нем содержится значительное количество слизей. В овсяной муке находится повышенное содержание микро- и макроэлементов, особенно калия, магния, кальция и железа, наиболее дефицитных в питании человека минеральных веществ, недостаток которых ведет к замедлению роста скелета, развитию рахита у детей, остеопороза у взрослых и анемии. Внесение овсяной муки в традиционную рецептуру взамен пшеничной муки повышает пищевую ценность готового крекера, а также расширяет ассортимент изделий.

Реологические свойства крекерного теста, содержащего овсяную муку в количестве 0(контроль), 10, 20, 30, 40 и 50 %, определяли методом капиллярной вискозиметрии, с использованием капилляра диаметром 3 мм и длиной 60 мм, что позволило повысить точность измерений путем существенного снижения погрешности эффекта входового участка капилляра.

По результатам экспериментов исследования сдвигового течения крекерного теста были построены кривые течения – зависимости касательного напряжения θ от скорости сдвига D. На рисунке 1 представлены экспериментальные точки кривых течения образцов крекерного теста, изображенные в логарифмических координатах.

На рисунке 1 кривая течения $\lg\theta=\lg\theta(\lg D)$ контрольного образца крекерного теста не содержащего овсяную муку, изображена с линией тренда, кривизна которой обращена выпуклостью к оси скорости сдвига $\lg D$. При этом кривые течения $\lg\theta=\lg\theta(\lg D)$ всех других образцов крекерного теста, содержащих овсяную муку в количестве 10, 20, 30, 40 и 50 %, имеют графики с противоположной кривизной, обращенной к оси касательного напряжения $\lg D$. Поэтому кривая течения контрольного образца была описана реологическим уравнением состояния Герщеля-Балкли:

$$\theta=\theta_0+kD^n \qquad (1)$$

Кривые течения $\lg\theta=\lg\theta(\lg D)$ образцов крекерного теста с содержанием овсяной муки были описаны трехпараметрическим реологическим уравнением состояния Герщеля-Балкли вида:

$$\theta=-\theta_0+kD^n \qquad (2)$$

где θ - касательное напряжение сдвига, кПа;
$-\theta_0$ предел текучести, кПа;

k – коэффициент консистенции, кПа·с^{n}
D - скорость сдвига, с$^{-1}$;
n – индекс течения.

Знак «минус» перед пределом текучести $-\theta_o$ в реологическом уравнении состояния образцов крекерного теста с содержанием овсяной муки говорит о значительных упругих свойствах теста, что обеспечивает направление кривизны графиков кривых течения образцов крекерного теста, содержащих овсяную муку, к оси касательных напряжений сдвига

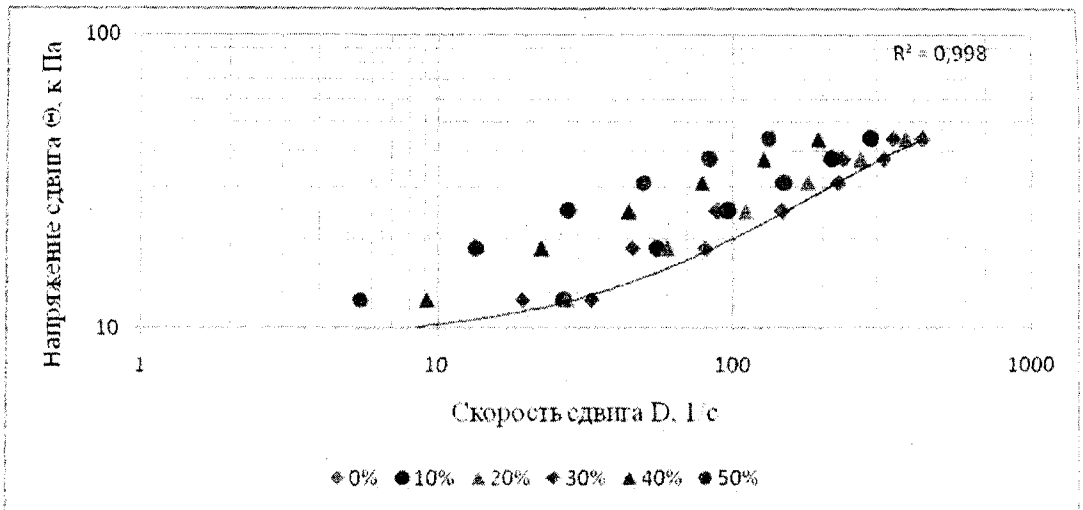


Рисунок 1 – Экспериментальные точки кривых течения $\lg\theta = \lg\theta(\lg D)$ ***образцов крекерного теста, содержащих овсяную муку в количестве: 0 (контроль), 10, 20, 30, 40 и 50 %***

В таблице 1 представлены численные значения параметров реологических уравнений состояния (1) и (2)образцов крекерного теста, содержащего овсяную муку.

Таблица 1 Реологические характеристики образцов крекерного теста, содержащих овсяную муку

Образцы крекерного теста с содержанием овсяной муки, %	Параметры реологического уравнения состояния $\theta = -\theta_o + kD^n$		
	Предел текучести, θ_0, кПа	Коэффициент консистенции k Па·с^n	Индекс течения, n
0 %	3,1	1,25	0,575
10 %	- 2,55	3,14	0,475
20 %	- 3,71	4,15	0,411
30 %	- 4,28	5,65	0,387
40 %	- 5,85	8,25	0,358
50 %	- 8,4	12,8	0,288

На рисунке 2 изображены графики параметров реологических уравнений состояния крекерного теста в зависимости от содержания овсяной муки.

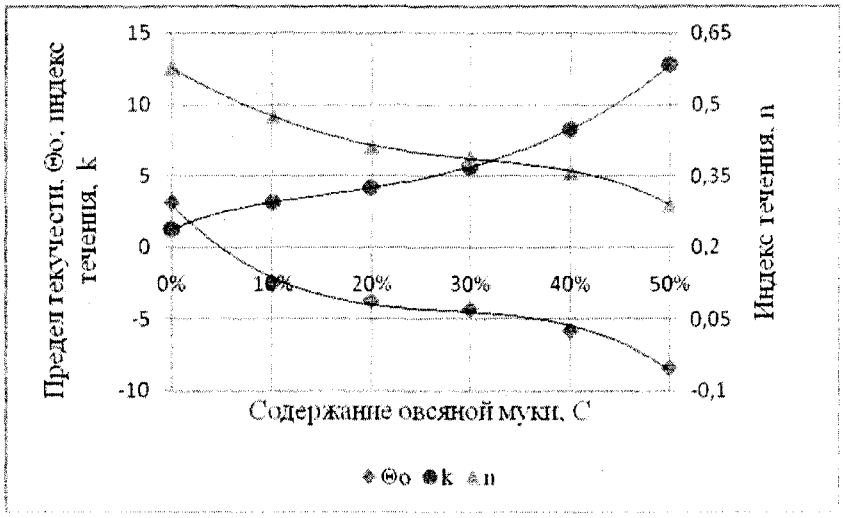


Рисунок 2 –Зависимости предела текучести, коэффициента консистенции и индекса течения крекерного теста от содержания овсяной муки

Из рисунка 2 можно видеть, что в области 30 %-го содержания в крекерном тесте овсяной муки графики предела текучести $\pm\theta_o$, коэффициента консистенции k и индекса течения n имеют точки перегиба. Контрольная выпечка показала, что готовые изделия из крекерного теста, содержащего 30 – 40 % овсяной муки имеет наилучшие качественные показатели.

В результате математической обработки экспериментальных данных получена аналитическая зависимость вязкости крекерного теста от содержания в нем овсяной муки, С:

$$\eta = -\frac{\theta_0}{D} + kD^{n-1},$$

где θ_0 = - 297,4 C^3 + 247,8 C^2 - 72,54C + 2,957; R^2=0,992

k = 147,9C^3-75,86 C^2+24,02C+1,272; R^2 = 0,999;

n = - 4,814C^3+4,129 C^2 - 1,435C+0,576; R2=0,998

На рисунке 3 изображены расчетные графические зависимости вязкости от скорости сдвига $\eta = \eta(D)$ образцов крекерного теста, содержащих 30 % и 40 % овсяной муки.

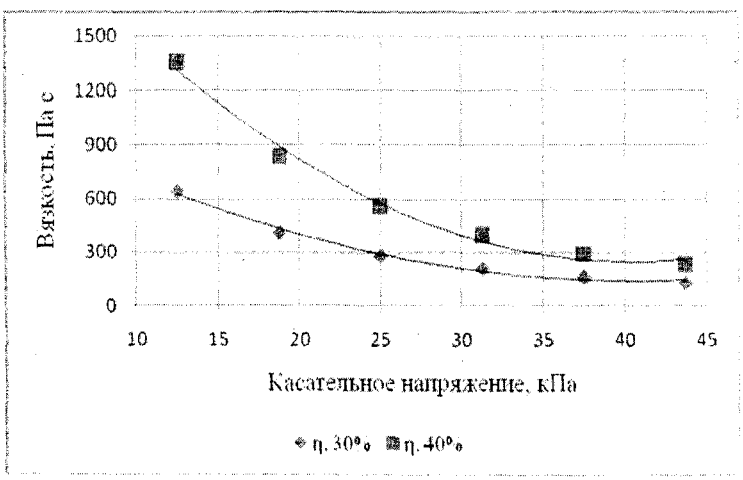


Рисунок 3 – Графики зависимости вязкости образцов крекерного теста, содержащего 30 и 40 % овсяной муки, от касательного напряжения

Из графиков рисунка 3 видно, что с увеличением касательного напряжения θ соотношение вязкости η образцов теста с содержанием 40 и 30 % овсяной муки снижается. При этом вязкость крекерного теста, содержащего 40 % овсяной муки выше вязкости теста с 30 % содержанием овсяной муки в 2,1 и 1,6 раза в зависимости от соответственного касательного напряжения 12,5 кПа и 68,75кПа, что подтверждает неньютоновское сдвиговое течение твердообразного крекерного теста повышенной пищевой ценности.

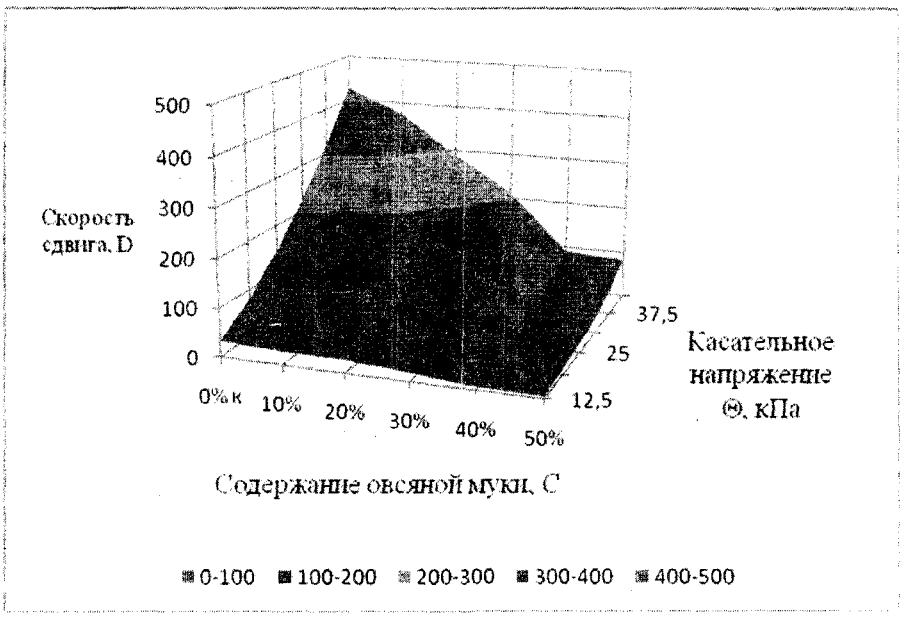


Рисунок 4 –Зависимость скорости сдвига от касательного напряжения крекерного теста с различным содержанием овсяной муки

Рисунок 4 демонстрирует влияние различного содержания овсяной муки на скорость сдвига и касательное напряжение крекерного теста, при этом зависимости скорости сдвига от касательного напряжения образцов крекерного теста с различным содержанием овсяной муки носит нелинейный характер.

В таблице 2 представлены характеристики качества готовых крекерных изделий повышенной пищевой ценности.

Таблица 2 – Показатели качества крекера с овсяной мукой через 2 часа после выпечки

Дозировка овсяной муки, %	Массовая доля влаги теста, %	Массовая доля влаги в готовых изделиях, %	Кислотность, град.	Намокаемость, %	Прочность, Н	Выход, %
0	26,0	6	0,8	178	57,00	73,3
10	25,8	6	0,8	183,3	26,4	73,2
20	25,6	6,2	0,8	141,2	31,2	73,3
30	25,2	6,2	1,2	200	46,0	72,9
40	25,2	6	1,2	205	49,0	72,9
50	25	6	1,2	144,6	40,7	72,7

Из таблицы 2 видно, что массовая доля влаги крекерного теста, содержащего соответственно 30 % и 40 % овсяной муки, в сравнении с контрольным образцом снизилась на 0,8 %; кислотность повысилась на 0,4 %; намокаемость увеличилась, в среднем, на 24,5 %; прочность готовых изделий понизилась на 11 – 14 % %; выход снизился на 0,4 %, при этом массовая доля влаги в готовых изделиях не изменились. Такое изменение показателей качества готовых изделий с овсяной мукой характеризует улучшение их органолептических характеристик и текстуры.

На рисунке 5 представлена суммарная оценка крекера с содержанием овсяной муки

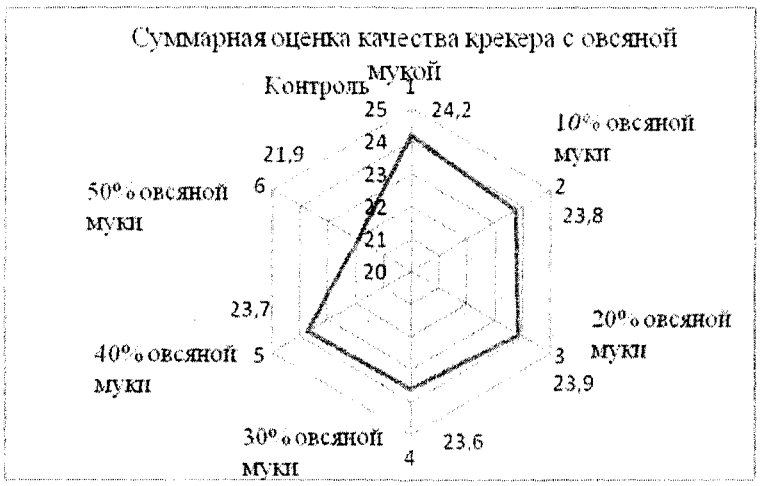


Рисунок 5 – Суммарная оценка качества крекеров с овсяной мукой

Согласно графику суммарной оценки качества крекера с содержанием овсяной муки, при добавлении различных дозировок овсяной муки происходит уменьшение суммарного показателя качества. Так, при внесении 10 и 20 % овсяной муки на 1,7 и 1,2 % соответственно; при замене 30 и 40 % пшеничной муки овсяной на 2,5 и 2,07 %. Меньше всего суммарная оценка качества в образцах с 50 % -й заменой пшеничной муки овсяной – 21,9 баллов, что меньше суммарной оценки контрольного образца на 9,5 % соотвественно. Уменьшение суммарной оценки связано с тем, что при внесении овсяной муки изделия приоретают сероватую окраску, а при дозировках больше 40 % - горьковатый вкус и остается послевкусие.

Установлено, что при увеличении содержания овсяной муки до 50 % в образцах происходит увеличение коэффициента консистенции, вязкости теста и снижение индекса течения. Полагаем, что такое изменение параметров реологического уравнения состояния крекерного теста связано с увеличением доли связанной влаги вследствие высокой водопоглотительной способности овсяной муки в отличие от пшеничной.

Увеличение доли овсяной муки в рецептуре крекеров свыше 40 % нецелесообразно из-за нарушения однородности структуры теста. При этом увеличивается вязкость, тесто получается крошащееся и доля твердой фазы в тесте увеличивается, что при производстве готовых изделий отрицательно сказывается на качестве крекеров.

Таким образом, на основании учета разнообразных качественных характеристик установлено рекомендуемое количество внесения овсяной муки взамен пшеничной в тесто для производства крекеров в количестве 30 % - 40 %, что повышает качественные показатели готовой продукции.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов [Текст] / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 213 с.

2. *Николаев, Б.А. Структурно-механические свойства мучного теста* [Текст] / Б.А. Николаев. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 137 с.

3. Реометрия пищевого сырья и продуктов [Текст] / Под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: ВО Агропромиздат, 1990. – 189 с.

Корячкин Владимир Петрович
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65
Тел. (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Матвеева Татьяна Владимировна научный сотрудник
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
кафедра «Технология хлебопекарного, кондитерского и макаронного производства»
302030, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 55 11 87; 8 920 828 90 43
E-mail: natkasap888@mail.ru

Николаева Мария Андреевна
Российский Государственный Торгово-Экономический Университет
Доктор технических наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой «Товароведения и экспертиза товаров»
125993, г. Москва, ул. Смольная, д.36
Тел.(495) 660-19-32;
E-mail: mail@rsute.ru

Сапронова Наталия Петровна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
Аспирант кафедры «Технология хлебопекарного, кондитерского и макаронного производства»
302030, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 55 11 87; 8 920 828 90 43
E-mail: natkasap888@mail.ru

V.P. KORYACHKIN, M.A. NIKOLAEVA,
T.V. MATVEEVA, N.P. SAPRONOVA

RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HIGH FOOD CRACKER TEST VALUES

The results of processing the samples rheometry cracker dough with oat flour, has identified the optimal dose of oat flour instead of wheat in the manufacture of crackers.

Key words: *rheometry, cracker dough, oat flour, crackers production*

BIBLIOGRAPHY

[1] Machikhin, Y.A. Engineering rheology of food materials [Text] / Y.A. Machikhin, S.A. Machikhin. - M.: Light and Food Industry, 1981. - 213 p.

[2] Nikolaev, B.A. Structural and mechanical properties of flour dough [Text] / B.A. Nikolaev. - Moscow: Food Industry, 1976. - 137 p.

[3] Rheometry of food raw materials and products [Text] / Ed. Y.A. Machikhina. - M: TO Agropromizdat, 1990. - 189 p.

Koryachkin Vladimir Petrovitch
FGBOU VPO «The state university – educational scientific-industrial complex»
Doctor of Engineering, professor, head of the department «Cars and devices of food productions»
302030, Orel, Moskovskaya St., 65
Ph. (4862) 55 11 87
E-mail: mapp@ostu.ru

Matveeva Tatiyana Vladimirovna, research associate
FGBOU VPO «The state university – educational scientific-industrial complex»
chair «Technology of baking, confectionery and macaroni production»
302030, Orel, Naugorskoye Highway, 29
Ph. (4862) 55 11 87; 8 920 828 90 43
E-mail: natkasap888@mail.ru

Nikolaeva Mariya Andreevna
Russian State Trade and Economic University
Doctor of Engineering, professor, acting as head of the department «Tovarovedenie and examination of the goods»
125993, Moscow, Smolnaya St., 36
Ph. (495) 660-19-32;
E-mail: mail@rsute.ru

Sapronova Natalya Petrovna
FGBOU VPO «The state university – educational scientific-industrial complex»
Graduate student of chair «Technology of baking, confectionery and macaroni production»
302030, Orel, Naugorskoye Highway, 29
Ph. (4862) 55 11 87; 8 920 828 90 43
E-mail: natkasap888@mail.ru

УДК 331.334.2:66.021.3

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, А.В. УВАРОВ, Г.Ю. ТАТАРИНОВА

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА В БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК – ОДЕЖДА – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

В статье рассматриваются актуальные проблемы исследования теплообмена человека с окружающей средой в условиях охлаждающего микроклимата и ветра. Авторами изложены расчетные принципы и предложена конструкция экспериментального стенда, позволяющего оценивать интенсивность теплообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда».

***Ключевые слова**: теплообмен, аэродинамическая камера, ветер, биотехническая система «человек - одежда - окружающая среда».*

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании специальной одежды необходимо учитывать, что суровость погоды определяется не только температурой воздуха, но и скоростью ветра. Ветер, с позиций теплообмена является отягощающим фактором. Подобные климатические условия характерны для большей части территории России. Однако, оценка влияния вида материалов и конструкции отдельных элементов на эффективность защиты человека от холода в условиях ветра проводится на основе косвенных показателей (например, по величине воздухопроницаемости).

Очевидно, что в большинстве случаев, специальная одежда, разработанная на таких косвенных показателях не обеспечивает эффективную защиту человека от холода, в условиях комбинированного воздействия пониженных температур и ветра. Одним из наиболее очевидных путей решения проблемы может стать разработка аэродинамических устройств, оснащенных приборами и устройствами для измерения расхода, температуры и влажности до и после контакта с поверхностью теплообмена (человеком).

Одним из первых аэродинамических устройств подобного плана является экспериментальный стенд, разработанный под руководством Кощеева В.С. в Институте Биофизики Минздрава (рисунок 1) [2]. Стенд позволяет определять численные значения величин конвективного теплообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда».

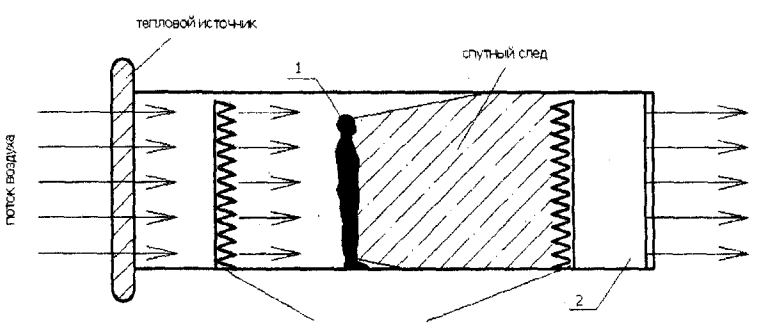


Рисунок 1 - Схема экспериментального стенда

Как видно, горизонтально набегающий поток воздуха, двигаясь по аэродинамической камере (поз. 2, рисунок 1) проходит через измерительную сетку, которая фиксирует параметры температуры и расхода. При теплообмене с телом испытуемого (поз.1, рисунок 2) воздух нагревается, в результате скорость его движения снижается, а температура возрастает. Их изменения фиксируются повторно с помощью второй измерительной сетки [2]. По соотношению термодинамических параметров воздуха до и после контакта с телом испытуемого могут быть определены конвективные потери тела человека.

С помощью метода разработана линейка образцов специальной одежды для защиты от холода. Однако, представленный стенд не позволяет разделять конвекцию на естественную и вынужденную составляющие; его конструкция не позволяет выравнивать поток воздуха, из-за чего невозможно обеспечить равномерный обдув испытуемого. В последнем случае процесс исследования процесса переноса тепла в структуре пакета одежды значительно усложняется.

В то же время, в основу метода положены фундаментальные законы сохранения импульса и энергии. Поэтому, после соответствующей модернизации метод может быть использован для оценки интенсивности теплового обмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда».

Актуальность подобных исследований не снижается: на современном рынке появляются новые ветрозащитные материалы и варианты утепленной одежды на их основе. Производителями такой одежды заявляются высокие свойства и показатели, адекватно проверить которые не всегда представляется возможным.

Ранее авторами предложены способ и устройство для определения конвективного теплообмена в системе «человек - одежда - окружающая среда» [3]. При их физической реализации необходимо определить конструктивные параметры и режимы их работы исходя из объективных закономерностях формирования циклонов и антициклонов.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕТРА

Модели высшего порядка (по классификации S.Schrek) построены на основе физических представлений о процессах формирования и перемещения вихрей. Их численное решение позволяет исследовать процессы перемещения воздушных масс с большим шагом сетки [4].

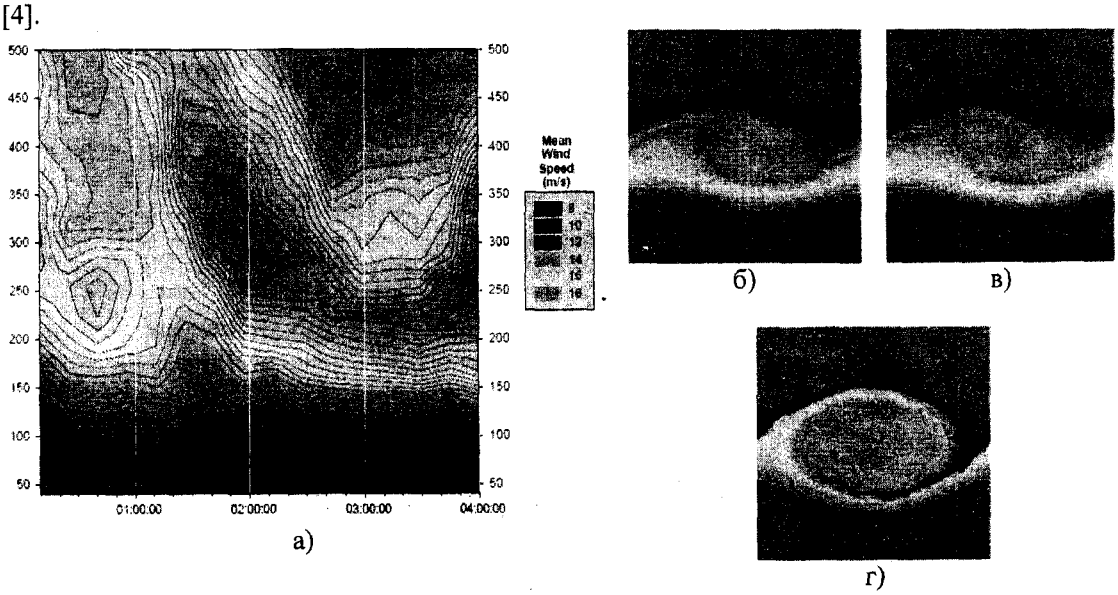


Рисунок 2 - Решения численных моделей ветра (а - поперечное сечение; б-г - турбулентное перемешивание воздушных масс с температурами б - 19°С; в - 31°С; г - 51°С)

Очевидно, что при исследовании процессов теплообмена человека с окружающей средой в условиях вынужденной конвекции, определяющее значение играют течения в относительно небольших по высоте слоях воздуха (около 2-х метров над земной поверхностью). Рассмотрим движение воздуха в рамках этого слоя для установившегося режима. Решение относительно распределения скоростей представлено на рисунке 1 а (по модели S.Schrek для сетки с шагом 50 м). В рамках приземного слоя изменение скорости движения воздуха составляют 2 м/с. Поэтому можно считать, что при изменении высоты на 2 м, скорость движения воздуха в установившемся течении может изменяться на 0,2 м/с, что является незначительным.

Колебание осредненной скорости движения воздуха в каждой отдельной точке над поверхностью земли составляет 1-2 м/с за 4 часа, или 0,5 м/с за час. Такие изменения не могут существенно повлиять на распределение температурного поля в структуре пакета одежды. Пульсационная составляющая ветра (порывистость) также не может существенно повлиять на динамику температурного поля в связи со своей малой продолжительностью. Поэтому режим теплообмена человека с окружающей средой при вынужденной конвекции условно может рассматриваться как квазистационарный.

Очевидно, что в некоторых случаях ветер имеет вихревую структуру, что обусловлено перемешиванием различно нагретых воздушных масс. В этом контексте, также важно определить влияние перепадов температур воздуха в зоне контакта с человеком. подобная задача может быть решена с помощью моделей низшего порядка (по классификации S.Schrek). На рисунках 1, б - г представлены результаты решения распределения температур в атмосферных вихрях по модели S. Kelley [4]. Анализ полученных решений также позволяет судить о незначительности температурных градиентов воздуха по длине и ширине зоны контакта с человеком.

Учитывая соотношение размеров вихря и площади контакта ветрового потока с телом человека, процесс переноса тепла, также можно считать квазистационарным.

КОНСТРУКЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

На основе проведенного выше анализа, могут быть сформулированы некоторые требования к экспериментальной установке моделирующей процессы теплообмена человека с окружающей средой в условиях вынужденной конвекции. Установка должна содержать:

- вентилятор, побуждающий движение воздуха с определенной скоростью, а также устройство для ступенчатого или плавного регулирования скорости движения воздуха;
- устройство для выравнивания эпюры скоростей движущегося воздуха для получения равномерного потока воздуха по длине и ширине зоны контакта с человеком или его тепловой моделью;
- теплообменную камеру, в которой будет располагаться человек или его тепловая модель; измерительные сетки, позволяющие интегрально оценивать термодинамическое параметры воздуха до и после контакта с тепловой моделью тела человека;
- аэродинамические приспособление, оснащенное метеорологическими приборами, которое позволяет проводить численную оценку теплообмена за счет вынужденной и естественной конвекции.

Авторами статьи разработана конструкция авторами статьи разработана конструкция аэродинамической установки для исследования интенсивности процессов тепломассоомбена в биотехнической системе «человек – одежда – окружающая среда», учитывающая представленные выше требования (рисунок 3).

Аэродинамическая установка представлена четырьмя основными узлами:

- вентиляторной камерой (поз.1), формирующей поток воздуха;
- подготовительной камерой (поз.2), выравнивающей эпюры скоростей его движения;
- теплообменной камерой (поз.3), в которой происходит контакт набегающего воздуха с биотехническим эмулятором, являющимся тепловой моделью тела человека;

- боковым (поз. 4) и верхним (поз. 5) аэродинамическими концентраторами, которые позволяют выделить конвективный теплообмен за счет естественную и вынужденную составляющие.

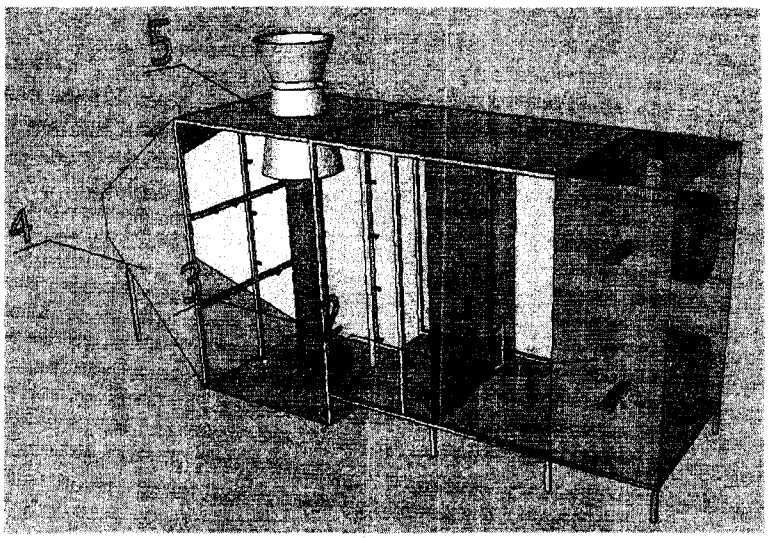
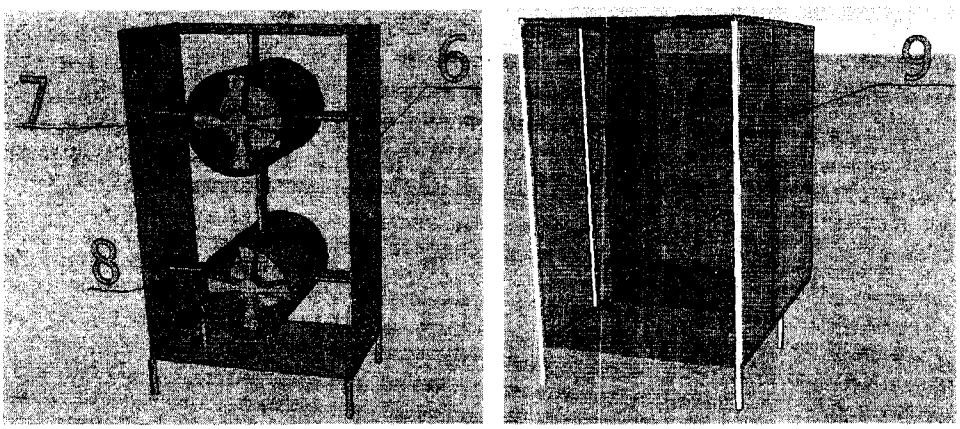


Рисунок 3 - Внешний вид установки

Вентиляторная камера (рисунок 4 а) оснащена вентиляторами (поз. 6), установленными на трехфазных асинхронных двигателях (поз. 7). Вентиляторы равномерно размещены относительно корпуса, что обеспечивает относительно равномерное по высоте и ширине камеры движения воздуха.



а) *б)*

Рисунок 4 - Вентиляторная и подготовительная камеры

Подготовительная камера (рисунок 3 б) позволяет выравнивать воздушный поток за счет соответствующих сеток (поз. 8), установленных на расстоянии l_x от входа воздуха в камеру. Расстояние l_x было рассчитано таким образом, чтобы сободно-затопленные струи воздуха успевали смешаться до выравнивания скоростей.

Термодинамические параметры равномерного воздушного потока измеряются при его поступлении в теплообменную камеру (рисунок 5), после чего воздух выступает в теплообмен с биотехническим эмулятором (поз. 10), за счет чего нагревается и смешивается.

В условиях теплообмена за счет смешанной конвекции, набегающий воздушный поток, нагреваясь от рабочей поверхности эмулятора разделяется на две части. Первая составляющая, нагреваясь от рабочей поверхности эмулятора (поз. 10, рисунок 5) поднимается

вверх и проходит сквозь отверстие верхнего концентратора (поз.11, рисунок 5), поступая на первичные преобразователи температуры и скорости движения. Вторая часть набегающего воздушного потока, характеризующая интенсивность вынужденной конвекции, нагреваясь после контакта с рабочей поверхностью и проходит через отверстие бокового концентратора (поз. 4, рисунок 3) [3].

Измерение термодинамических параметров воздуха в этом случае проводится до и после контакта воздуха в рабочей поверхностью эмулятора, для чего в конструкцию теплообменной камеры введены измерительные сетки, представляющие собой деревянные цилиндрические мачты (поз.12 рисунок 5), с установленными на них первичными преобразователями температуры (поз. 13, рисунок 4).

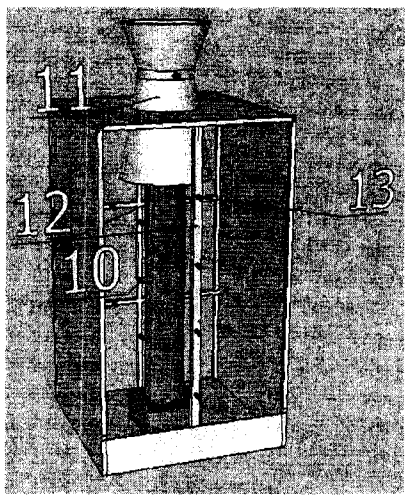
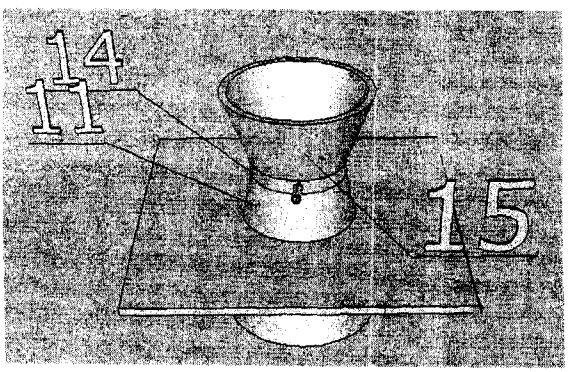
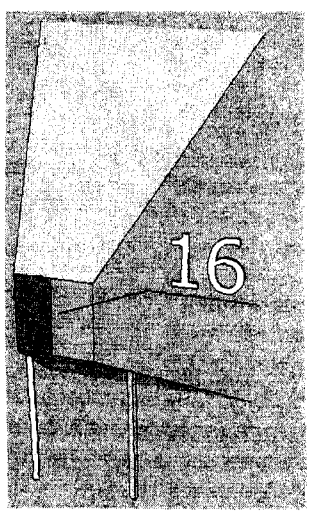


Рисунок 5 - Теплообменная камера

Верхний концентратор воздушного потока (рисунок 6 а) смонтирован в крышке теплообменной камеры и представляет собой усеченный конус, расширяющийся книзу (поз. 11), оснащен измерительным кольцом (поз. 14) и диффузором (поз. 15). В измерительном кольце может быть размещен чувствительный элемент термоанемометра-термометра ТТМ-2.



а)



б)

Рисунок 6 - Верхний (а) и боковой (б) концентраторы воздушного потока

Поверхность бокового концентратора воздушного потока представляет собой боковые грани пирамиды (рисунок 6 б), в выходном отверстии которого смонтирован узел, позволяющий регулировать скорость движения воздуха в теплообменной камере (рисунок 7). Узел представляет собой рамку (поз. 17) с направляющими пазами (18). В рамке могут быть установлены пластины, отличающиеся друг от друга размером выходного отверстия.

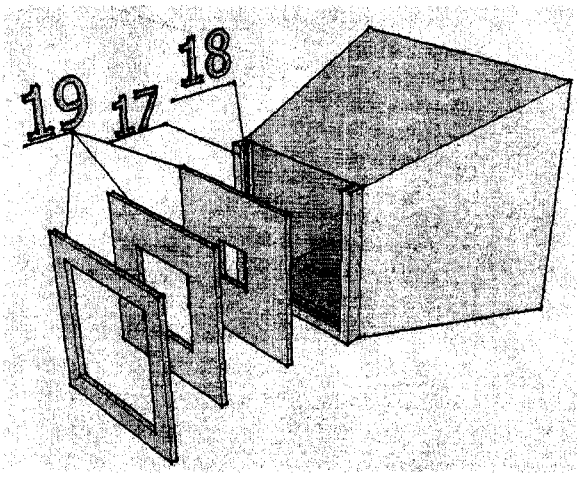


Рисунок 7 -Узел регулирования скорости движения воздуха

В выходном отверстии также, может быть размещен чувствительный элемент термоанемометра-термометра ТТМ-2, для чего авторами разработано соответствующее крепежное устройство.

Внутренняя поверхность пластины создает аэродинамическое сопротивление набегающему воздушному потоку. Величина аэродинамического сопротивления определяется площадью поверхности пластины. Поэтому, регулируя параметры выходного отверстия за счет смены пластин, возможно изменять скорость движения воздуха. Пластины, используемые авторами позволяют получать в теплообменной камере поток воздуха со скоростями 0,5 м/с; 2м/с; 4 м/с.

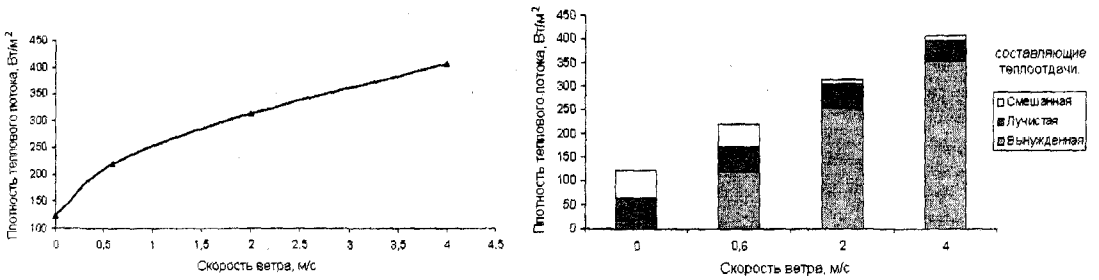
Для проведения экспериментальных исследований, на рабочую поверхность эмулятора необходимо послойно разместить исследуемый пакет одежды. При этом, на внешнюю поверхность каждого слоя нашиваются первичные преобразователи температуры согласно схемам, разработанным авторами ранее [1].

Биотехнический эмулятор оснащен автоматизированной системой, которая позволяет изменять тепловую энергию, подаваемую в рабочий объем эмулятора. Поэтому, измерительные сетки, первичные преобразователи температуры в пакете одежды, автоматизированная система позволяют исследовать полный тепловой баланс системы «человек - одежда - окружающая среда».

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С помощью разработанного аэродинамического стенда, а также соответствующего методического обеспечения авторами проведены многочисленные исследования интенсивности теплообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда». Некоторые результаты исследований представлены на рисунке 8.

В частности, на рисунке 8, а представлена динамика плотности теплового потока с рабочей поверхности биотехнического эмулятора, в зависимости от скорости движения воздуха при режиме теплообмена Δt=20°С. На рисунке 8, б - составляющие теплоотдачи с рабочей поверхности биотехнического эмулятора, в зависимости от скорости движения обдувающего воздуха.



а) *б)*

Рисунок 8 - Результаты исследований теплообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда» в условиях ветра

Как видно, наиболее значительный прирост в уровне теплоотдачи наблюдается интенсивность при изменении скорости движения воздуха от 0 до 0,6 м/с (почти в два раза). Характер изменения теплоотдачи с повышением скорости движения воздуха в исследованном диапазоне близок к линейному. Плотность теплового потока с поверхности эмулятора при скорости обдува 4 м/с в 1,8 раза выше, чем при скорости обдува 0,6 м/с.

При увеличении скорости движения обдувающего воздуха, изменяется соотношение составляющих теплоотдачи. Так, в случае спокойного воздуха, теплоотдача с поверхности эмулятора осуществляется естественной конвекцией и тепловым излучением (соответственно 47 и 52 %). При появлении сравнительно небольшой скорости движения воздуха (0,5 м/с), доля естественной конвекции уменьшается до 22 % (в структуре смешанной), доля лучистой составляющей – 24 % и вынужденно конвективной – 54 % от общей теплоотдачи. При возрастании скорости движения воздуха до 4 м/с, доля естественной конвекции (в структуре смешанной) уменьшается до 2 %, лучистой составляющей до 11 %, вынужденной конвекции возрастает до 87 %.

ВЫВОДЫ

Оценка интенсивности процессов теплообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда» при вынужденной конвекции является актуальной проблемой. Она может быть решена за счет проведения исследований с помощью аэродинамических установок и тепловых моделей тела человека.

Авторский вариант такой установки позволяет не только определять численных значения интенсивности теплообмена человека с окружающей средой в условиях ветра, но и разделять теплообмен на составляющие. Результаты экспериментальных исследований позволяют определять долю каждой составляющей теплообмена при различных режимах, что позволяет уточнять требования к теплозащитной одежде в условиях комбинированного воздействия холода и ветра, а также оценивать эффективность новых конструктивных решений.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А.В. Разработка методики экспериментальных исследований температурных полей в пакетах одежды [Текст] / А.В. Абрамов, М.В. Родичева //«Известия вузов. Технология легкой промышленности», 2009. - №4. - С.40-43.

2. Кошеев, В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода [Текст] / В.С. Кощеев // М: Медицина, 1981. – 188 с.

3. Пат. 2205403 Российская Федерация МПК7 G01N33/36 Способ и устройство для определения конвективного теплообмена и скорости испарения влаги в системе «человек - одежда - окружающая среда» [Текст] / А.В. Уваров, А.Г. Уваров; Заявитель: Орловский государственный технический университет № 2002115186/12, опубл 27.05.2003. Приоритет 06.06.2002 – 14 с.

4. Schreck, S. U.S. Department of Energy Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization [Text] / S. Schreck, J. Lundquist, and W. Shaw // NREL. – 2008. – 116 p.

Родичева Маргарита Всеволодовна
Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»
Телефон (4862) 55-11-20
E-mail tikshi@ostu.ru

Абрамов Антон Вячеславович
Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Телефон (4862) 76-14-39
E-mail bgdgtu@mail.ru

Уваров Александр Васильевич
Орловский государственный аграрный университет, г.Орел
Старший научный сотрудник, доцент кафедры Общестроительных дисциплин
E-mail uvarov_av@bk.ru

Татаринова Галина Юрьевна
Госуниверситет - УНПК, г. Орел
студент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Телефон (4862) 55-11-20
E-mail tikshi@ostu.ru

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, A.V. UVAROV, G.I. TATARINOVA

DEVICE FOR RESEARCH OF PROCESSES OF COMBINED HEAT EXCHANGE IN BIOTECHNICAL SYSTEM «THE PERSON – CLOTHES – ENVIRONMENT»

In article actual problems of research of heat exchange of the person with environment in the conditions of a cooling microclimate and a wind are considered. Authors stated settlement principles and the design of the experimental stand, allowing to estimate intensity of heat exchange in biotechnical system «the person - clothes - environment» is offered.

***Keywords**: heat exchange, the aerodynamic chamber, a wind, biotechnical system «the person - clothes - environment».*

BIBLIOGRAPHY

[1] Abramov, A.V. Development of a technique of pilot studies of temperature fields in clothes packages [Text] / A.V. Abramov, M.V. Rodicheva // News of higher education institutions. Technology of light industry. – 2009. - №4 - Pp. 40-43.

[2] Koshcheev, V. S. Physiology and hygiene of individual protection of the person from cold of [Text] / V.S. Koshcheev / Medicine. - 1981. - 188 p.

[3] Pat. 2205403 RUS MPK7 G01N33/36 Way and the device for definition of convective heat exchange and speed of evaporation of moisture in system «the person - clothes - environment» [Text] / A.V. Uvarov, A.G. Uvarov; Applicant: OSTU No. 2002115186/12, publish. 27.05.2003. prior. 06.06.2002 – 14 p.

[4] Schreck, S. U.S. Department of Energy Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization [Text] / S. Schreck, J. Lundquist, and W. Shaw // NREL. – 2008. – 116 p.

Rodicheva Margarita Vsevolodovna
State University - ESPC, Orel
Cand. tech. sci., senior lecturer, head of the department «Technology and designing of garments»
Phone (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Abramov Anton Vyacheslavovich
State University - ESPC, Orel
Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Labor and environmental protection»
Phone (4862) 76-14-39
E-mail: bgdgtu@mail.ru

Uvarov Alexander Vasilievihc
Orel State Agrarian University, Orel
senior research associate, department «All-construction disciplines»
E-mail uvarov_av@bk.ru

Tatarinova Galina Iourievna
State University - ESPC, Orel
student department «Technology and designing of garments»
Phone (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 658.53

Н.В. АНЦЕВА, Н.И. ПАСЬКО

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ СОСТОЯНИЯ

В статье представлена разработанная документированная процедура управления системой технического обслуживания и ремонта технологического оборудования машиностроительных предприятий по критерию эксплуатационной технологичности.

Ключевые слова: *техническое обслуживание, ремонт, технологическое оборудование, техническая эксплуатация, система, контроль, информационная поддержка*

Основная задача повышения качества эксплуатации металлообрабатывающего оборудования состоит в обеспечении длительной и безотказной обработки на нем деталей с заданными производительностью, точностью и чистотой обработки при минимальных затратах времени, труда и средств на техническое обслуживание и ремонт. С целью снижения этих затрат, а так же потерь, связанных с ремонтом и неисправностью оборудования, предприятия организуют системы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования (СТОИР ТО), соответствующие требованиям ГОСТ 15.601-98 и ГОСТ 18322-78 и проводят систематическую работу в направлении оптимизации управления СТОИР ТО.

В соответствии с концепцией международных стандартов ИСО серии 9000 повышение эффективности управления СТОИР ТО должно осуществляться на основе принципов процессного подхода с применением к процессу ТОиР цикла Деминга PDCA. Практическая реализация данного принципа предполагает установление критерия результативности, получение информации о состоянии СТОИР ТО для осуществления мониторинга этого процесса, а также выполнение действий, необходимых для достижения запланированных результатов и постоянного улучшения данного процесса.

Управление СТОИР ТО осуществляется воздействием на режим ТОиР, характеризуемый периодичностью технического обслуживания и ремонта и максимально допускаемым отклонением критерия предельного состояния оборудования от нормативного значения. Следствием эффективного осуществления данного воздействия является улучшение содержания действующего оборудования и четкое осуществление всех видов его периодичных технических обслуживаний и плановых ремонтов. Это способствует повышению эксплуатационной технологичности, которую целесообразно использовать в качестве критерия результативности процесса ТОиР.

Анализ состава регламентируемых ГОСТ Р 27.002-2009 и ГОСТ 21623-76 показателей эксплуатационной технологичности показывает, что основную массу среди них составляют показатели трудоемкости различных видов работ, выполняемых при эксплуатации технологического оборудования. Поэтому данные о затратах времени на ТОиР металлообрабатывающего оборудования характеризуют состояние СТОИР ТО и могут быть использованы для осуществления мониторинга процесса ТОиР.

В настоящее время на промышленных предприятиях применяются укрупнённые нормативы периодичности выполнения ремонта для разных видов оборудования, которые не учитывают особенности конкретного предприятия. Это обусловливает необходимость совершенствования методики оптимизации периодичности выполнения ремонта оборудования и разработки критерия нормальности объема ремонтных работ.

Вопросы повышения качества ремонтного обслуживания оборудования и методы определения его ремонтопригодности и эксплуатационной технологичности исследовали мно-

гие ученые. Однако задача повышения эксплуатационной технологичности оборудования за счет оперативного управления периодичностью выполнения ремонта и величиной критического уровня критерия предельного состояния узлов с учетом параметров распределения наработки между отказами металлообрабатывающего оборудования не нашла окончательного решения.

Данные обстоятельства обусловили необходимость разработки методики повышения эксплуатационной технологичности металлообрабатывающего оборудования на основе оптимизации периодичности контроля его технического состояния и критического уровня состояния узлов станка, при котором следует проводить профилактическое восстановление.

Организация управления системой СТОИР ТО по техническому состоянию предполагает проведение оценок объемов технических ТОиР оборудования и эффективности СТОИР ТО соответствующими показателями, в том числе показателями ремонтопригодности и эксплуатационной технологичности. В соответствии с ГОСТ 14.205-83, ГОСТ Р 27.002-2009, ГОСТ 18322-78, ГОСТ 21623-76 ремонтопригодность и эксплуатационная технологичность оцениваются рассчитываемыми за определенные период эксплуатации или наработку показателями трудоемкости различных видов работ, выполняемых при эксплуатации металлообрабатывающего оборудования. Причем ГОСТ 21623-76 допускает использование удельных показателей, представляющих собой отношение среднего значения соответствующего показателя к заданной наработке оборудования, которая при установлении режима профилактического восстановления оборудования определяется периодичностью контроля технического состояния объекта профилактики.

ГОСТ 21623-76 определяет и категорию объединенных показателей для оценки ремонтопригодности и эксплуатационной технологичности оборудования в виде сумм соответствующих удельных показателей [2]:

$$\Theta = э_о + э_п + э_к = \frac{Э_о \cdot H_о + Э_п \cdot P_п + Э_к \cdot P_к}{t_п}, \quad (1)$$

где $э_о = \overline{Э}_о / t_п$ – удельные суммарные затраты времени на восстановление по отказу; $э_п = \overline{Э}_п / t_п$ – удельные суммарные затраты времени на профилактическое восстановление оборудования; $э_к = \overline{Э}_к / t_п$ – удельные суммарные затраты времени на осмотр оборудования; $t_{\text{П}}$ – периодичность проверки технического состояния станка по наработке (заданная наработка).

Поэтому комплексный (интегральный) показатель совокупности свойств эксплуатационной технологичности (Ф) является функцией от затрат времени на контрольные осмотры и восстановления профилактические и по отказу, т. е. $\Phi = f(Э_к, Э_п, Э_о)$, и эксплуатационную технологичность можно оценивать по объединенным удельным затратам времени как обратную им величину $\Phi = 1/\Theta$.

Причем при определении объединенных удельных затрат времени методы определения множителей у экономических констант $Э_о$, $Э_п$, $Э_к$ и времени эксплуатации или наработки, определяющих период регенерации процесса восстановления, зависят от способа моделирования ремонтного обслуживания.

Для определения экономических констант $Э_о$, $Э_п$, $Э_к$ необходимы данные о затратах времени на техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающего оборудования. Для их определения разработана адаптивная методика экспресс-оценки объемов плановых технических обслуживаний и ремонтов технологического оборудования, построенная на основе линейной полиномиальной модели с n-параметрическими переменными:

$$\hat{Y} = a_1 \cdot x_1 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_2 \cdot x_2 + a_{22} \cdot x_2^2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + a_{i\ldots j} \cdot x_i^i \cdot \ldots \cdot x_j^j + \ldots + a_n x_n^m, \quad (2)$$

где вектор оценок элементов a_i, вычисляется по методу наименьших квадратов.

На начальных этапах внедрения разработанной методики, когда информация о трудоемкости ремонтных работ отсутствует, предлагается применять предварительное «обучение» модели, основанное на использовании аппроксимации регрессионными зависимостями типовых укрупненных норм времени на работы по ремонту различных типов оборудования. В дальнейшем методика работает в режиме самообучения, которое заключается в том, что по мере накопления данных о реальной трудоёмкости ремонтных работ в конкретном производстве соответствующее регрессионное уравнение уточняется за счёт автоматического пересчёта вектора коэффициентов.

Одной из первоочередных задач организации СТОИР ТО является разработка режима ремонтного обслуживания станков, включающего периодичность контроля технического состояния и уровни определяющих параметров различных узлов, достижение которых требует их замены или ремонта.

Существует много моделей профилактического восстановления, однако они являются теоретическими и построены на основе многочисленных допущений, поэтому они сложны для практического применения и требуют интерпретации для каждого конкретного случая.

В настоящее время известны интерпретации данных моделей для регламентации обслуживания металлорежущего инструмента. Для технологического оборудования необходимо разработать модель системы ремонта по техническому состоянию, отличающуюся большей общностью. Разработка данной модели была проведена исходя из предположения, что для каждой единицы технологического оборудования разрабатывается свой план ремонтного обслуживания, включающий назначение периодичности контроля технического состояния и назначение критических уровней критериев предельного состояния, при превышении которых требуется восстановление объекта. При возникновении отказа план контрольных осмотров возобновляется, то есть назначаются новые сроки контрольных осмотров.

Разработаны два варианта модели ремонта по техническому состоянию: с постоянными (рисунок 1) и с переменными интервалами контроля технического состояния [2].

Для каждого варианта модели разработаны соответствующие зависимости для определения основных показателей системы СТОИР ТО. В качестве критерия оптимальности режима ремонтного обслуживания используются объединенные удельные затраты на восстановление, приходящиеся на единицу наработки.

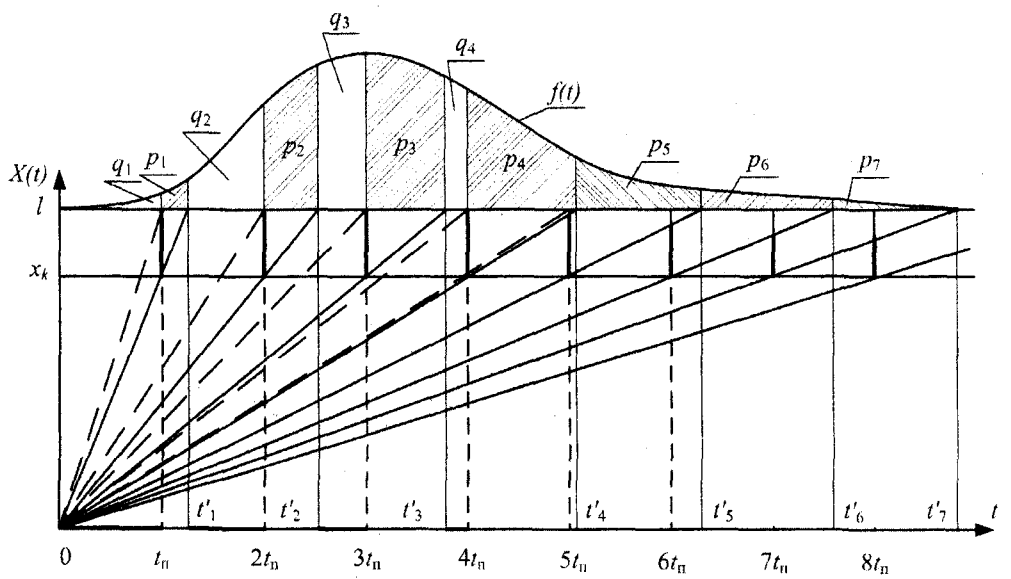


Рисунок 1 – Модель ТОиР технологического оборудования с постоянными интервалами контроля технического состояния

Для практической реализации предложенных моделей разработан алгоритм оптимизации режима ремонтного обслуживания с использованием численного метода расчета показателей СТОИР ТО [3].

Представленные аналитические модели рассматривают только ресурс оборудования по наработке и не учитывают тот факт, что весь цикл эксплуатации объекта (рисунок 2) включает (кроме применения по назначению (участок 1)) хранение, транспортирование, техническое обслуживание, а также простои по различным техническим или организационным причинам, например ожидание применения по назначению (участок 2). Во время указанных периодов простоя изменение определяющих параметров оборудования отсутствует.

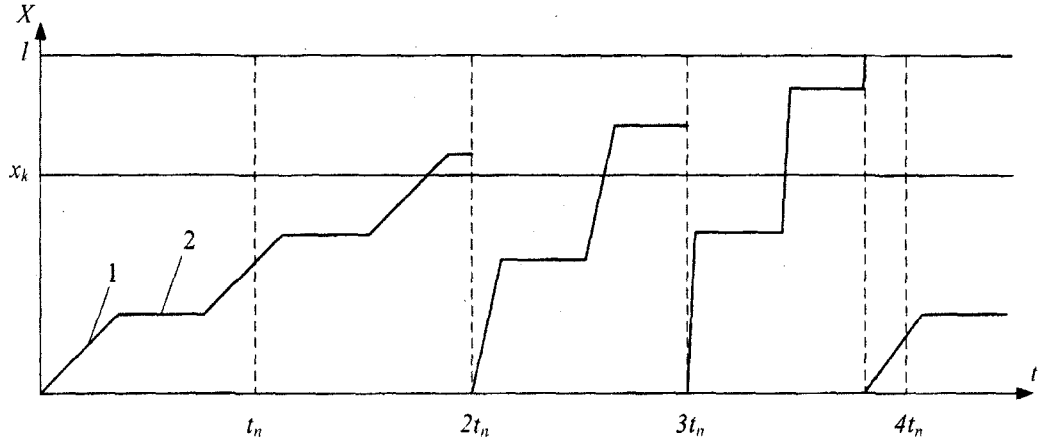


Рисунок 2 – Цикл эксплуатации объекта

Поэтому для учёта календарной наработки оборудования была разработана вероятностная модель, описывающая следующие двенадцать вариантов профилактического восстановления [3]:

1) жесткий график восстановления узлов оборудования;

2) график со сдвигом начала отсчета наработки при отказе узла;

3) график с пропуском предстоящего планового восстановления при отказе узла;

4) график осмотров с заданной периодичностью и восстановлением по состоянию;

5) скользящий график с плановыми осмотрами, со сдвигом начала отсчёта периода профилактического восстановления при возникновении отказа;

6) график с плановыми осмотрами и пропуском профилактики при отказе.

Варианты с седьмого по двенадцатый аналогичны первым шести, но в них учитывается календарное время.

В разработанной вероятностной модели участки реализации определяющего параметра оборудования при использовании его по назначению описываются распределением Вейбулла, а участок простоя – показательным распределением.

В результате статистического моделирования определяется оптимальный по критерию эксплуатационной технологичности календарный график периодических осмотров технического состояния оборудования и ответственные узлы оборудования, подвергаемые контрольному осмотру в соответствующем периоде.

Разработанные модели профилактического восстановления рассматривают график профилактики только для одного узла или оборудования в целом, если его состояние можно оценить некоторым определяющим параметром (критерием предельного состояния) X. В результате образуется несколько не связанных между собой графиков технического обслуживания отдельных узлов одной и той же единицы металлообрабатывающего оборудования. Если проводить профилактики металлообрабатывающих станков по такому набору графиков, то это приведет к необоснованному увеличению общих простоев оборудования. Поэтому решена задача согласования графиков контрольных осмотров технического состояния от-

дельных узлов технологического оборудования и разработки общего графика профилактического восстановления станка в целом на основе группирования полученных в результате моделирования оптимальных периодов профилактического восстановления отдельных узлов оборудования. При этом объединенные удельные затраты для каждого узла остаются в области оптимальных значений.

Разработана методика минимаксной оптимизации режима технического обслуживания с использованием численного метода расчета показателей процесса профилактического восстановления. Разработка проводилась в предположении, что значения числовых характеристик функции надёжности оборудования (средняя наработка между отказами $\overline{T}$ и коэффициент вариации K) на практике известны только приближённо, и с уверенностью можно задать только интервалы $(T_1 \ldots T_2)$ и $(K_1 \ldots K_2)$, в которых они находятся [1].

При этом потери из-за отличия реальных значений характеристик функции надёжности оборудования от принятых при оптимизации составляют $\Delta\Theta = \Theta(t_{\text{пi}}^*, x_{ki}^*, \overline{T}, K) - \Theta(t_{\text{пi}}^*, x_{ki}^*, T_i, K_i)$.

Практическое применение данного подхода обеспечивает минимизацию потерь, возникающих в случае разработки стратегии профилактического восстановления по параметрам $\overline{T}$ и K, отличающихся от реально присутствующих в данной реализации цикла профилактического восстановления.

Управление системой СТОИР ТО по критерию эксплуатационной технологичности следует осуществлять на основе использования цикла Деминга PDCA. Причем циклы управления системой СТОИР ТО необходимо проводить в ответ на действие возмущающих факторов таких, как ввод в эксплуатацию нового и отремонтированного металлообрабатывающего оборудования, изменение интенсивности отказов оборудования, повышение уровня технологического брака, увеличение количества сбоев выполнения технологических операций, а также при установлении руководством предприятия новых целевых значений показателей системы СТОИР ТО. В результате постоянного совершенствования управления системой СТОИР ТО повышаются значения показателей эксплуатационной технологичности относительно их текущего гарантированного уровня.

Новый достигнутый ремонтной службой предприятия уровень показателей эксплуатационной технологичности необходимо закрепить, обеспечив соответствующее гарантирование. В качестве инструмента такого гарантирования целесообразно использовать разработанный алгоритм оптимизации режима технического обслуживания технологического оборудования с периодическим контролем.

На основе вышеизложенного разработана экспертная система информационной поддержки нормирования работ по ТОиР технологического оборудования, в которой практически реализованы адаптивная методика экспресс-оценки объемов технических обслуживаний и ремонтов технологического оборудования и механизмы ее обучения и самообучения. Первоначальное обучение системы осуществлено на основе типовых укрупненных норм времени на работы по ремонту оборудования, разработанных Государственным ПКТИ «Главстанкоремналадка» и выпускаемых в виде сборников таблиц. При этом выполнены инфологическое и датологическое моделирование базы данных укрупненных нормативов и разработана реляционная модель базы данных о работе ремонтной службы.

Разработана система информационной поддержки оптимизации режима ТОиР технологического оборудования с периодическим контролем технического состояния. Практическое применение данной системы предполагает наличие информации о наработке обслуживаемого оборудования между отказами, которую можно получить в результате наблюдения за эксплуатацией станков на машиностроительных предприятиях. Для решения указанной задачи был выполнен статистический анализ данных о ремонтном обслуживании технологического оборудования на одном из машиностроительных предприятий Тульского региона. В результате установлено, что статистические данные о наработке между отказами хорошо ап-

проксимируются распределением Вейбулла с соответствующими параметрами.

С помощью разработанной системы информационной поддержки оптимизации режима ТОиР технологического оборудования выполнено исследование СТОИР ТО. Получены зависимости удельных затрат от периодичности ТОиР при различных значениях критического уровня определяющего параметра; от критического уровня определяющего параметра при различных значениях периодичности ТОиР; от коэффициента вариации наработки между отказами при постоянном и переменном периодах контрольных осмотров технического состояния; от разброса наработки между отказами при различных законах ее распределения и постоянной периодичности ТОиР. Исследованы зависимости вероятности профилактического восстановления, коэффициента использования ресурса технологического оборудования, числа осмотров технического состояния станков до технического обслуживания или ремонта, от периодичности контроля технического состояния при различных значениях критического уровня определяющего параметра. Для случая подчинения распределения наработки между отказами закону Вейбулла исследовано влияние разброса наработки между отказами на коэффициент использования оборудования, оптимальную периодичность профилактического восстановления, оптимальный критический уровень определяющего параметра и среднее число осмотров.

В результате анализа влияния режима ремонтного обслуживания на результативность СТОИР ТО с периодическим контролем технического состояния установлены сложная зависимость удельных затрат от параметров режима ремонтного обслуживания (рисунок 3), слабое влияние закона распределения и негативное влияние разброса наработки металлообрабатывающего оборудования между отказами на показатели процесса ремонтного обслуживания.

Порядок применения разработанных систем укрупненного нормирования работ по ТОиР металлообрабатывающего оборудования и информационной поддержки оптимизации режима ремонтного обслуживания станков при практическом использовании методики управления СТОИР ТО по критерию эксплуатационной технологичности нормативно закреплен в документированной процедуре «Управление режимом технического обслуживания и ремонта технологического оборудования», учитывающей параметры случайного разброса наработки оборудования между отказами и гибкость графика контроля его технического состояния. Данная документированная процедура разработана с учетом возможности введения ее в состав документации системы менеджмента качества машиностроительного предприятия.

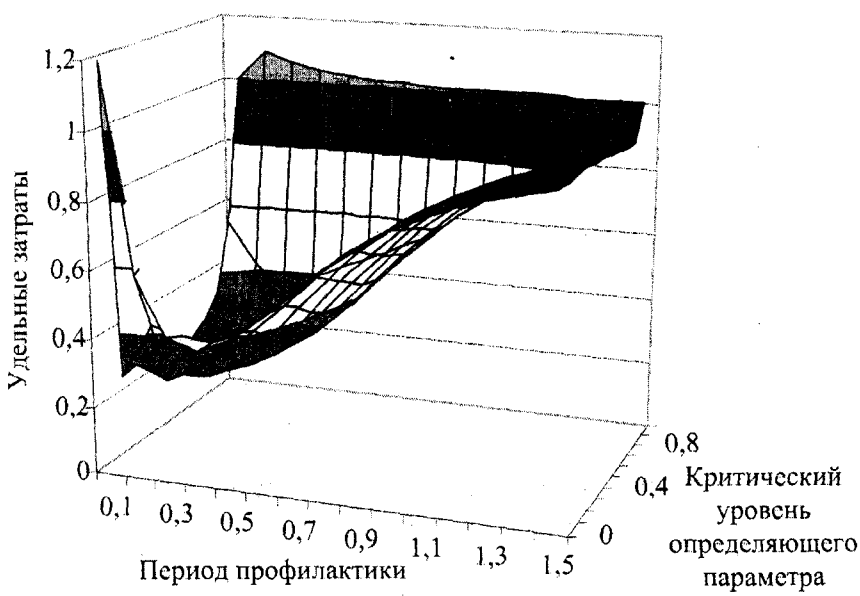


Рисунок 3 – Зависимость удельных затрат от параметров режима ТОиР

Практическое применение представленного подхода в ЗАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин Тульской обл.) позволило обеспечить высокие технико-экономические показатели ремонтной службы предприятия и минимизировать затраты трудовых и материальных ресурсов на выполнение ремонтных работ, а также потери основного производства, связанные с ремонтом и неисправностью оборудования.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасько, Н.И. Минимаксная оптимизация режима профилактического восстановления технологического оборудования [Текст] / Н.И. Пасько, Н.. Анцева // СТИН. - 2009. - №4. - С. 10 – 14.

2. Пасько, Н.И. Оптимизация режима профилактического восстановления основного технологического оборудования машиностроительного предприятия [Текст] / Н.И. Пасько, Н.. Анцева // СТИН. - 2008. - №4. - С. 2-6.

3. Пасько, Н.И. Статистическая модель процесса технического обслуживания и ремонта металлообрабатывающего оборудования [Текст] / Н.И. Пасько, Н.. Анцева // Известия ТулГУ. Технические науки. - Вып. 2. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2008. - С. 10 – 18.

Наталья Витальевна Анцева
Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
Тел: (4872) 35-18-87
E-mail: anzeva@rambler.ru

Николай Иванович Пасько
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
Тел: (4872) 35-18-87

N.V. ANTSEVA, N.I. PASKO

QUALITY MANAGEMENT OF MAINTAINANCE OF MANUFACTURING EQUIPMENT WITH PERIODICAL STATE CONTROL

Developed documentary procedure of control of maintanance and repair system of manufacturing equipment of machine-building enterprises based on maintenance workability criteria is represented.

Key words: *maintanance, repair, manufacturing equipment, maintenance workability, system, control, infotainment.*

BIBLIOGRAPHY

[1] Pasko, N.I. Minimax optimization of preventive recovery mode of manufacturing equipment [Text] / N.I. Pasko, N.V. Antseva // STIN. - 2009. - №4. - Pp. 10 – 14.

[2] Pasko, N.I. Optimization of preventive recovery of in-line equipment of machine-building enterprise [Text] / N.I. Pasko, N.V. Antseva // STIN. - 2008. - №4. - Pp. 2 – 6.

[3] Pasko, N.I., Statistical model of maintanence and repair process of metal-working machinery [Text] / N.I. Pasko, N.V. Antseva // News of TSU. Technical sciences. - №2. - Tula: publishing house of TSU. - 2008 – Pp. 10-18.

Natalya Vitalyievna Antseva
Candidate of Engineering, associate professor
Tula State University,
Tula
Phone: (4872)35-18-87
E-mail: anzeva@rambler.ru

Nicolay Ivanovich Pasko
Doctor of Engineering, professor
Tula State University,
Tula
Phone: (4872)35-18-87

УДК 658.562

А.Г. ИВАХНЕНКО, В.Е. ПУЗАНОВ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИНАМИКИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

В статье рассматриваются базовые положения динамики качества продукции, опирающиеся на теоретические основы динамики механических систем. Проведены аналогии между основными понятиями динамики механических систем и понятиями динамики качества продукции. Получена зависимость изменения качества продукции от ее сложности, потенциала предприятия, сопротивления изменениям, требований потребителей и других заинтересованных сторон.

Ключевые слова: *динамика, качество продукции, требования потребителей, предприятие.*

ВВЕДЕНИЕ

Современная экономическая ситуация характеризуется жесткой конкуренцией производителей машиностроительной продукции. Для того чтобы в сложившейся ситуации промышленные предприятия могли не только выживать, но и успешно развиваться, им необходимо постоянно повышать качество выпускаемой продукции.

В современных условиях объективная необходимость повышения уровня качества продукции обусловлена несколькими причинами:

- качество продукции становится одним из решающих факторов повышения эффективности производства и интенсивного развития экономики в целом;
- выпуск некачественной продукции наносит большой экономический ущерб, как отдельным предприятиям, так и всей национальной экономике;
- изменяется психология потребителя и его требования к качеству продукции;
- качество является одним из важнейших факторов конкурентоспособности продукции в условиях усиления конкурентной борьбы за рынки сбыта.

Рост технического уровня и качества выпускаемой продукции является в настоящее время наиболее характерной чертой работы предприятий в промышленно развитых странах. В условиях преобладающей неценовой конкуренции и насыщенного рынка именно высокое качество продукции служит главным фактором успеха.

Вместе с тем на многих отечественных предприятиях наблюдается и обратный процесс – снижение качества продукции с течением времени и как следствие этого – уменьшение удовлетворенности потребителя, а иногда и его потеря.

Таким образом, качество продукции, выпускаемой предприятием, с течением времени не является неизменной величиной – оно постоянно находится в динамике.

Динамика качества – раздел науки о качестве, посвященный исследованию динамических систем и процессов, связанных с изменением показателей качества продукции с течением времени.

Изменение качества выпускаемой предприятием продукции обусловлено изменением требований и ожиданий к ней со стороны потребителей и других заинтересованных сторон, изменением конкуренции, потенциала, имеющегося у предприятия и т.д.

В настоящее время особый интерес вызывают методы, позволяющие оценивать и прогнозировать изменение качества машиностроительной продукции с течением времени. Существующие методы анализа динамики качества продукции в основном имеют статистическую направленность. Необходимость использования ретроспективной информации о качестве продукции, небольшой период упреждения прогноза, невозможность учитывать в явном виде большого количества влияющих факторов и т.д. ограничивают возможность применения данных методов.

Таким образом, существует необходимость создания новых методов и моделей оценки и прогнозирования динамики качества продукции, позволяющих избежать указанных недостатков, а также учесть влияние на изменение показателей качества продукции таких фак-

торов как сложность продукции, потенциал организации, требования потребителей и других заинтересованных сторон.

Основы динамики качества продукции.

В работе предложены базисы динамики качества продукции на основе аналогии с динамикой механических систем.

Проведем аналогии между некоторыми величинами механики и понятиями в динамике качества продукции.

Аналогом перемещения тела в пространстве относительно выбранной системы отсчёта в рассматриваемом случае является изменение значений показателя качества с течением времени относительно значений базового показателя. Уровень качества продукции подобен пройденному пути, причем начало его отсчета может быть как в нулевой точке, так и в точке, соответствующей расстоянию, пройденному до начала отсчета времени. Первый вариант соответствует изменению качества новой продукции, второй – изменению качества продукции, существовавшей до начала отсчета времени.

Таким образом, аналогом механического движения в динамике качества является изменение качества продукции с течением времени относительно заданных нормативов.

Механическое движение также характеризуется скоростью. Скорость – векторная физическая величина, характеризующая быстроту перемещения и направление движения материальной точки в пространстве относительно выбранной системы отсчёта [1]. Аналогом скорости в динамике качества будем считать быстроту изменения значений показателя качества продукции.

Также как и при движении механических систем, в динамике качества продукции изменение может быть равномерным, если за любые равные промежутки времени качество продукции изменяется одинаково, или равноускоренным.

Ускорением будем считать быстроту изменения скорости, с которой меняется качество продукции, т.е. изменение величины скорости за единицу времени. Изменение качества продукции, при котором скорость изменения за любые равные промежутки времени меняется одинаково, будем считать равнопеременным. При таком изменении ускорение остаётся постоянным по модулю и по направлению. Равнопеременное изменение качества продукции может быть равноускоренным или равнозамедленным.

Изменение качества продукции на предприятии происходит в результате воздействия на него различных сил, которые разделяются на силы, вынуждающие предприятие повышать качество продукции и силы, оказывающие сопротивление этому повышению.

Силы, заставляющие предприятие повышать качество продукции – это постоянно растущие требования потребителя к ее качеству. Поскольку требования к качеству определяет потребитель, не может существовать такого понятия, как постоянный уровень качества. Качество должно постоянно возрастать, ибо качество – это постоянно меняющаяся цель. И если предприятие стремиться быть успешным на рынке, оно должно непрерывно повышать качество своей продукции.

К силам сопротивления будем относить силы, препятствующие повышению качества и направленные в сторону, противоположную изменению. При осуществлении мероприятий по улучшению качества продукции на предприятии неизбежно возникают силы сопротивления. Эти силы способны замедлять повышение качества продукции в организации, делать его малоэффективным. К таким силам можно отнести незаинтересованность персонала в повышении качества продукции, низкий уровень качества исходных материалов, недостаточная квалификация персонала, высокая сложность изделий и т.д. Силы сопротивления повышению качества продукции являются одной из основных проблем, стоящих перед развивающейся организацией.

Аналогом массы при исследовании динамики качества продукции будет являться мера сложности продукции. При изменении качества продукции сложность является инерционной составляющей. Инерционность сложности продукции заключается в том, что при внешнем воздействии в виде постоянно растущих требований потребителей качество продукции

не может изменяться мгновенно. Именно в немгновенности и проявляется инерционный характер сложности изделия.

Для определения меры сложности воспользуемся исследованиями в области теории конструктивно-технологической сложности, разработанной научной школой под руководством профессоров Ю.С. Шарина и Б.А. Якимовича.

Конструктивно-технологическая сложность машиностроительного изделия представляет собой неотъемлемое его свойство, учитывающее геометрические, структурные и субстантные свойства изделия и его структурных составляющих, а также предъявляемые к ним конструкторские и технологические требования в соответствии с существующим уровнем развития производительных сил, и рассматривается как мера затрат ресурсов на реализацию различных этапов жизненного цикла машиностроительного изделия [2].

Конструктивно-технологическая сложность машиностроительного изделия представляет собой комплексный показатель, обобщающий ряд показателей сложной технической системы - машиностроительного изделия, и определяется как функция, аддитивная относительно конструкторско-технологической сложности непосредственно входящих в неё деталей и применяемых к ним технологических переделов. Для расчета конструктивно-технологической сложности, соответствующей конкретному технологическому переделу, разрабатываются математические модели, общим принципом формирования которых является иерархическая декомпозиция детали на структурные составляющие, которая сопровождается выделением элементарных сущностей, таких как: конструктивно-технологические элементы, элементарные работы и т.д.

В частности, в основу математической модели, позволяющей определять конструктивно-технологическую сложность технологического передела «механическая обработка», заложена декомпозиция детали - сборочной единицы на элементарные поверхности, получившие наименование конструктивно-технологических элементов [3].

Для описания совокупности всех возможных конструктивно-технологических элементов выделено множество порождающих элементов, каждому из которых сопоставляется элементарная трудоемкость его изготовления при получении определенным технологическим способом. Таким образом, любой представитель множества порождаемых элементов формируется путем модификации геометрических, конструктивных и технологических характеристик порождающего элемента. Порождаемые конструктивно-технологические элементы составляют исходное множество, непосредственно используемое для формирования информационной модели детали.

В данном контексте конструктивно-технологический элемент представляет собой элементарную поверхность, которая характеризуется, с одной стороны, определенной геометрической формой, т.е. способом формирования, с другой стороны, конструкторско-технологическими параметрами и характеристиками, представленными в виде коэффициентов, определяемых в соответствии с разработанными методиками. Сложность конкретного элемента определяется с использованием мультипликативной функции, зависящей от коэффициентов, учитывающих его параметры [4].

Конструкторско-технологическая сложность зависит от материала, размеров изделия требований к точности его изготовления, типа используемой заготовки и т.д.

Для оценки конструкторско-технологической сложности изделий используются методы, описанные в работах [2,3,4].

Сложность, с одной стороны, это мера трудоемкости обработки детали, а с другой стороны – свойство, некий параметр самой детали, как точность, шероховатость и др. Сложность определяется вне зависимости от технологического процесса обработки, ее оценка не требует предварительной разработки техпроцесса, она может быть определена на стадии конструирования по рабочему чертежу детали. Конструктор, выполняя рабочий чертеж, имеет возможность определить с его помощью конструктивно-технологическую сложность.

Таким образом, показатель конструктивно-технологической сложности изделия характеризует меру его сложности.

Время, которое нужно предприятию для достижения требуемого качества продукции, обладающей определенной степенью сложности, зависит от начальной скорости изменения. Если предприятие впервые начинает изменять качество своей продукции, то начальная скорость равна нулю. Если же качество продукции ранее уже подвергалось изменению, то к началу отсчета времени скорость изменения имеет вполне определенное значение.

На рисунке 1 представлена зависимость времени, необходимого предприятию для достижения требуемого потребителем качества продукции, от меры сложности продукции.

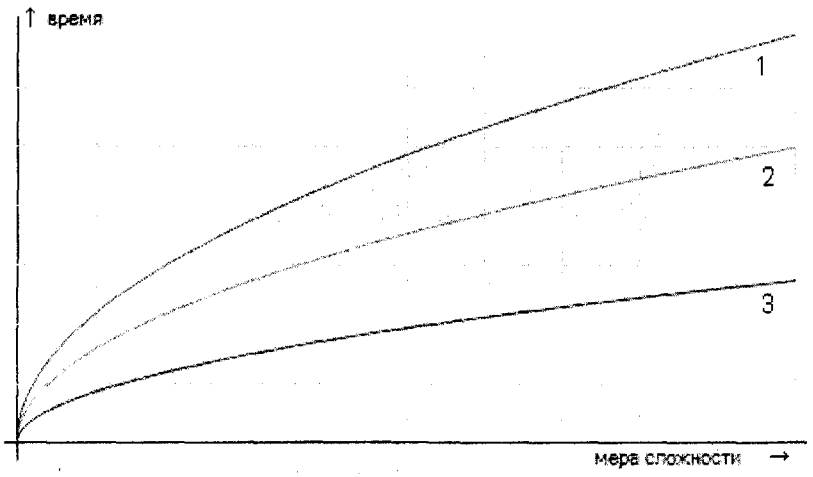


Рисунок 1 – Зависимость времени, необходимого предприятию для достижения требуемого потребителем качества продукции, от меры сложности продукции

График 1 соответствует случаю, когда начальная скорость равна нулю, т.е. предприятие начинает повышать качество продукции практически «с нуля». Графики 2 и 3 описывают случай, когда начальная скорость не равна нулю, причем на графике 3 скорость изменения больше. Таким образом, можно сделать вывод: чем больше начальная скорость изменения качества продукции, тем меньше времени необходимо предприятию для достижения требуемого уровня качества продукции, обладающей определенной сложностью.

Имеющийся у организации потенциал (ресурсы) аналогичен податливости механической системы. С помощью своего потенциала предприятие должно уметь быстро реагировать на внешние и внутренние изменения и подстраиваться под них.

Под потенциалом предприятия принято понимать совокупность показателей или факторов, характеризующих его силу, источники, возможности, средства, запасы, способности, ресурсы и многие другие резервы, которые могут быть использованы в экономической деятельности. Потенциал любого предприятия оказывает наибольшее влияние не только на качество выпускаемой продукции, но и на пределы экономического роста и структурного развития всей организации. Идентифицируя наличие ресурсов с понятием «потенциал», выделяют трудовой, технический, организационный, имущественный, финансовый и прочие потенциалы, которые определяют способность предприятия достигать поставленные перед ним цели. Наличие любого вида потенциала и его использование определяет в той или иной степени результат деятельности предприятия [5].

По нашему мнению, изменение показателя качества продукции во времени (x) может описываться зависимостью, сходной по своей структуре с соответствующей зависимостью, описывающей вынужденные колебания горизонтального пружинного маятника при наличии сопротивления:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + 1/c = F(x_{cp} - x_0),$$

m – сложность продукции;

k – коэффициент сопротивления изменению качества;

c – потенциал организации;

$x_{тр}$, x_0 – значения требуемого (ожидаемого) потребителем уровня показателя качества продукции и его фактического (начального, текущего) значения;

$F(x_{тр} - x_0)$ – внешнее воздействие, характеризующее требования и ожидания потребителя показателя к показателю качества продукции.

После решения данного уравнения можно определить, как необходимо предприятию изменять качество своей продукции, обладающей определенной сложностью, с учетом сил сопротивления изменению, требований потребителей и других заинтересованных сторон, а также имеющегося у предприятия потенциала.

Для того чтобы осмысленно управлять изменением качества продукции с учетом изменения ее сложности, сопротивления изменениям и потенциала организации, необходимо знать возможные вариации данных параметров. Т.к. в рассматриваемом случае каждый из параметров (сложность, сопротивление и потенциал) могут иметь 3 состояния: возрастать, убывать или оставаться неизменными, то по теореме о перемножении шансов общее количество возможных вариантов будет равно 27 (таблица 1).

Таблица 1 – Варианты изменения сложности продукции, потенциала организации и сопротивления изменениям

№	Сложность продукции	Сопротивление изменениям	Потенциал организации
1	↑	*const*	*const*
2	↓	*const*	*const*
3	↑	*const*	↑
4	↑	*const*	↓
5	↓	*const*	↑
6	↓	*const*	↓
7	↑	↑	*const*
8	↑	↓	*const*
9	↓	↑	*const*
10	↓	↓	*const*
11	*const*	↑	↑
12	*const*	↑	↓
13	*const*	↓	↑
14	*const*	↓	↓
15	*const*	↑	*const*
16	*const*	↓	*const*
17	*const*	*const*	↑
18	*const*	*const*	↓
19	↑	↑	↑
20	↑	↑	↓
21	↑	↓	↓
22	↑	↓	↑
23	↓	↑	↑
24	↓	↑	↓
25	↓	↓	↑
26	↓	↓	↓
27	*const*	*const*	*const*

Данные варианты в последующем могут быть учтены при разработке методов прогнозирования показателей качества продукции.

Коэффициент сопротивления изменению качества k зависит как от сложности продукции, так и от потенциала предприятия. Действительно, высокая сложность продукции зачастую является существенным ограничением для непрерывного повышения качества продукции. Так, например, многие современные отечественные предприятия не готовы выпускать продукцию, соответствующую по качеству и сложности мировым аналогам.

Невысокий потенциал предприятия также может значительно сдерживать изменение качества продукции. Незаинтересованность персонала в повышении качества продукции, высокая текучесть кадров, использование устаревшего оборудования, применение материалов и полуфабрикатов, снижающих конкурентоспособность продукции, отсутствие гибкости организационной структуры являются часто труднопреодолимой преградой на пути непрерывного повышения качества продукции.

Для успешного преодоления таких барьеров необходимо тщательно планировать проведение изменений, своевременно выявлять причины и источники сопротивления. Немаловажная роль в этом принадлежит руководству предприятия. От того, насколько быстро и эффективно руководство фирмы реагирует на появление сопротивлений изменениям, зависит будущее организации.

Дальнейшее развитие динамики качества связано с решением следующих вопросов:

1) правомерностью рассмотрения только одного показателя качества, например - интегрального показателя, как это осуществляется в квалиметрии;

2) построением методик определения коэффициентов левой части уравнения;

3) видом внешнего воздействия;

4) допустимостью использования линейных дифференциальных уравнений.

Решение оставленных вопросов связано с объяснением имеющихся фактов и явлений, так и с прогнозированием еще не известных. Так, например, установлено, что характер представленной на рисунке 1 зависимости, соответствует времени выполнения ремонтных работ различных типов оборудования, в т.ч. металлорежущих станков.

Вывод.

В работе предложены базовые положения динамики качества продукции; проведены аналогии между основными понятиями динамики механических систем и понятиями динамики качества продукции; получена зависимость изменения качества продукции от ее сложности, сопротивления изменениям, требований потребителей и других заинтересованных сторон и потенциала предприятия; рассмотрены различные варианты изменения сложности продукции, сопротивления изменениям и потенциала организации.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 2001. – 405 с.

2. Коршунов, А.И. Определение конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия [Текст] / А.И. Коршунов // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 9. – С. 27-32.

3. Коршунов, А.И. Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения [Текст] / А.И. Коршунов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 66-67.

4. Коршунов, А.И. Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия [Текст] / А.И. Коршунов // Фундаментальные исследования. – 2006. – №11. – С. 36-37.

5. Попов, Е.В. Рыночный потенциал предприятия [Текст] / Е.В. Попов. – М.: Экономика, 2002. – 559 с.

Александр Геннадьевич Ивахненко
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск
Тел: 8-910-313-79-20
E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Вадим Евгеньевич Пузанов
Аспирант
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск
Тел: 8-910-213-31-30
E-mail: vadim060587@yandex.ru

A.G. IVAKHNENKO, V.E. PUZANOV

BASIC PROVISIONS OF A PRODUCT QUALITY DYNAMICS

The relied in theoretical bases of the mechanical systems' dynamics basic provisions of a product quality dynamics is offered. Analogies between the main concepts of dynamics of mechanical systems and concepts of a product quality dynamics are drawn. The dependence of a product quality change from a production complexity, capacity of the enterprise, resistance to changes and requirements of consumers and others interested parties is received.

Keywords: *dynamics, product quality, the requirement of consumers, the enterprise.*

BIBLIOGRAPHY

[1] Trofimova, T. I. Course physics [Text] / T.I. Trofimova. – M: Vysshaja shkola, 2001. – 405 p.

[2] Korshunov, A.I. Determination of constructive and technological complexity of a machine-building product [Text] / A.I. Korshunov // Automation and modern technologies. – 2006. – № 9. – Pp. 27-32.

[3] Korshunov, A.I. Introduction in the theory of constructive and technological complexity of products of mechanical engineering [Text] / A.I. Korshunov // Modern high technologies. – 2004. – № 2. – Pp. 66-67.

[4] Korshunov, A.I. Research of constructive and technological complexity of a machine-building product [Text] / A.I. Korshunov // Basic researches. – 2006. – № 11. – Pp. 36-37.

[5] Popov, E.V. Market capacity of the enterprise [Text] / E.V. Popov. – M.: Economy, 2002. – 559 p.

Alexander Gennadjevich Ivakhnenko
PhD, professor
Southwest State University, Kursk
Phone: 8-910-213-31-30
E-mail: ivakhnenko2002@mail.ru

Vadim Evgenjevich Puzanov
Post-graduate student
Southwest State University, Kursk
Phone: 8-910-213-31-30
E-mail: vadim060587@yandex.ru

УДК 658.562

А.Н. ИНОЗЕМЦЕВ, В.Ю. АНЦЕВ

РАЗРАБОТКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕЖЦЕХОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ

В статье представлено решение задачи управления технологичностью машинокомплекта производственного подразделения на основе установления рационального компромисса между напряженностью производственных заданий, характеризуемой составом и трудоемкостью машинокомплекта, и риском выпуска несоответствующей продукции.

Ключевые слова: *машинокомплект, межцеховая технологическая маршрутизация, квалиметрическая оценка, риск несоответствий, трудоемкость*

В рамках технологической подготовки машиностроительного производства осуществляется формирование организационно-технологической структуры производственного процесса изготовления машин. Она представляет собой совокупность связей технологического процесса изготовления машины, конструкторской и технологической подготовки производства, а также организации обслуживания производственного процесса, обеспечивающей упорядоченность, координацию и регулирование деятельности технологической системы.

При выполнении технологического процесса предмет труда последовательно проходит по цехам и производственным участкам в соответствии с выполняемыми технологическими операциями. Указанную последовательность называют межцеховым технологическим маршрутом. На основе межцеховых технологических маршрутов формируются машинокомплекты подразделений предприятия. Машинокомплект представляет собой совокупность де-

талей и узлов, входящих в данное конкретное изделие и изготавливаемых в данном цехе в пропорциях, предусмотренных его конструкцией, а также деталей, идущих на индивидуальный или кратный выпуск комплектов запасных частей [1].

Рациональное формирование машинокомплектов производственных подразделений позволяет значительно снизить напряженность производственных заданий и, как следствие, риск выпуска несоответствующей продукции. Поэтому риск выпуска несоответствующей продукции является системным свойством машинокомлекта как множества составляющих его предметов труда.

ГОСТ 14.205-83 определяет технологичность конструкции изделия при производстве как совокупность свойств конструкции, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат на изготовление для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Поэтому заводские технологи при разработке вариантов межцеховой маршрутизации решают задачу практической стандартизации маршрутов на основе их квалиметрической оценки по таким показателям технологичности, как трудоемкость изготовления изделия по этому маршруту и риск выпуска несоответствующей продукции с учетом условий выполнения работ. Для оценки рациональности машинокомплекта в целом они вынуждены интуитивно оперировать категорией его технологичности, как универсума свойств машинокомлекта относительно множеств свойств составляющих его предметов труда. Установление рационального компромисса между такими показателями качества производственного процесса изготовления машин как напряженность производственных заданий, характеризуемой составом и трудоемкостью машинокомплекта, и риском выпуска несоответствующей продукции, составляет задачу управления технологичностью машинокомплекта производственного подразделения, являющейся важным показателям качества производственного процесса.

Необходимость совершенствования методов межцеховой технологической маршрутизации обусловлена феноменом межцеховых технологических маршрутов. Они могут быть альтернативными. Это характерно для средних и крупных предприятий, имеющих сложную структуру, включающую в себя десятки производственных подразделений с аналогичными технологическими возможностями. Для предприятий с такой производственной структурой задача рациональной межцеховой технологической маршрутизации имеет существенное значение с точки зрения управления качеством, поскольку она определяет не только эффективность производственного процесса, но и уровень качества продукции предприятия.

Проектирование организационно-технологических структур производственного процесса изготовления машин осуществляется технологами вместе со специалистами других профессиональных групп, отвечающих за различные аспекты производственного процесса [2]. К этим аспектам можно отнести управление качеством, управление и организацию производства, материально-техническое обеспечение, применение средств автоматики и вычислительной техники, экономику предприятия, конструирование машин и др. Качество конечного результата их работы зависит от четкости и полноты представлений о производственном процессе, понимания каждым специалистом своих задач, согласованности их действий и полезности принимаемых решений с точки зрения конечной цели производства. Большое количество участников процесса разработки проектных решений обусловливает важнейшую проблему технологического проектирования – наличие межаспектных противоречий и связанных с ними неопределенностей. Присутствие данных неопределенностей при практической реализации технологических проектных решений ведет к нерациональному использованию и перерасходу различных производственных ресурсов: временных, материальных, информационных, а также производственных мощностей. Однако этому факту до последнего времени специалистами в области технологии машиностроения и управления качеством уделялось недостаточное внимание.

Разрешать межаспектные противоречия при технологическом проектировании предлагается на основе построения системы информационных связей, адекватно отражающих закономерности функционального взаимодействия технологов с другими участниками разра-

ботки проектных решений. При этом в практику технологического проектирования оценки качества проектных решений необходимо привлечение лингвистических средств и методов квалиметрии. Феноменологическая модель, раскрывающая закономерности функционального взаимодействия технологов со специалистами других профессиональных групп машиностроительного предприятия при разработке межцеховых технологических маршрутов и формировании машинокомплектов подразделений, построена на основе методологии структурного анализа и проектирования IDEF0 (рисунок 1).

Выполнена формализация процесса разработки технологического маршрута для конкретного предмета труда. При этом предполагается, что технолог, принимая во внимание множество $F = \{F_1, F_2, \ldots, F_p\}$ частных факторов, существенно влияющих на выбор маршрута движения предметов труда по производственным подразделениям предприятия, выбирает предпочтительный маршрут из множества возможных (допустимых) технологических маршрутов $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_s\}$. Для выбора предпочтительного варианта осуществляется квалиметрическая оценка

$$\psi = f(q_1, q_2, \ldots, q_e) = \sum_{i=1}^{i=e} c_i q_i ,$$

где q_i – единичные показатели качества, c_i – положительные или отрицательные коэффициенты. Положительные коэффициенты ставятся при тех единичных показателях качества, которые следует максимизировать, отрицательные – при тех, которые следует минимизировать. Абсолютные значения коэффициентов («веса») соответствуют степени относительной важности единичных показателей качества.

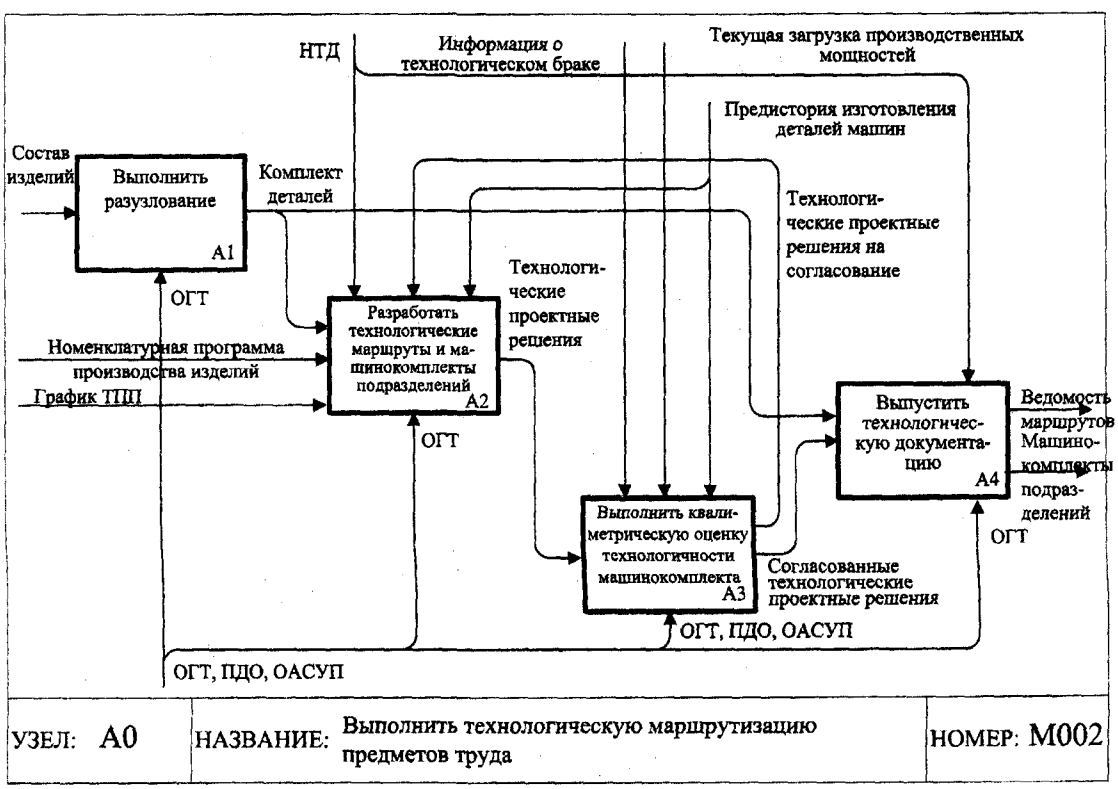


Рисунок 1 – Модель функциональных взаимодействий при решении задачи технологической маршрутизации предметов труда

На основе классификации различных объектов производства разработана система единичных показателей качества технологического маршрута, используемых при квалиметрической оценке технологичности машинокомплекта, а также система логических и лингвистических условий и ограничений $L=\{L_1,L_2,\ldots,L_m\}$. Единичными показателями качества при квалиметрической оценке альтернативных вариантов межцеховых технологических маршрутов и машинокомплектов производственных подразделений являются: технологичность машинокомплекта, уровень качества продукции, риск несоответствий в производстве, себестоимость продукции, время производственного цикла, число различных производственных подразделений, участвующих в производственном цикле и др.

Каждый технологический маршрут формируется в результате учета технологом всех p логических условий и ограничений L_i, поэтому окончательное решение данной задачи будет характеризоваться выполнением логической функции $L=\bigwedge_{i=1}^{i=m} L_i$.

В случае существования нескольких альтернативных межцеховых технологических маршрутов, удовлетворяющих разработанным логическим условиям и ограничениям, разработчик проектных решений выбирает наиболее предпочтительный из них на основе использования нечеткого отношения предпочтения. Для его применения введена лингвистическая переменная <«Риск несоответствий», T, [0, 100]>, где T={«Незначительный», «Малый», «Средний», «Высокий», «Очень высокий»}.

Значения лингвистической переменной «Риск несоответствий» из терм-множества T описываются нечеткими переменными с соответствующими наименованиями и ограничениями на возможные значения. Разработаны функции принадлежности нечетких множеств, описывающих значения лингвистической переменной «Риск несоответствий». Причем первоначально данные функции принадлежности были построены в результате проведения экспертизы. В дальнейшем, на основании учета данных о технологическом браке в различных производственных подразделениях предприятия и напряженности производственных заданий в них, а также неформальных субъективных суждений разработчиков проектных решений о качестве выпускаемой продукции в том или ином подразделении, вид функций принадлежности в режиме самообучения непрерывно уточняется. Схема обучения и самообучения при корректировке содержания лингвистической переменной «Риск несоответствий» представлена на рисунке 2.

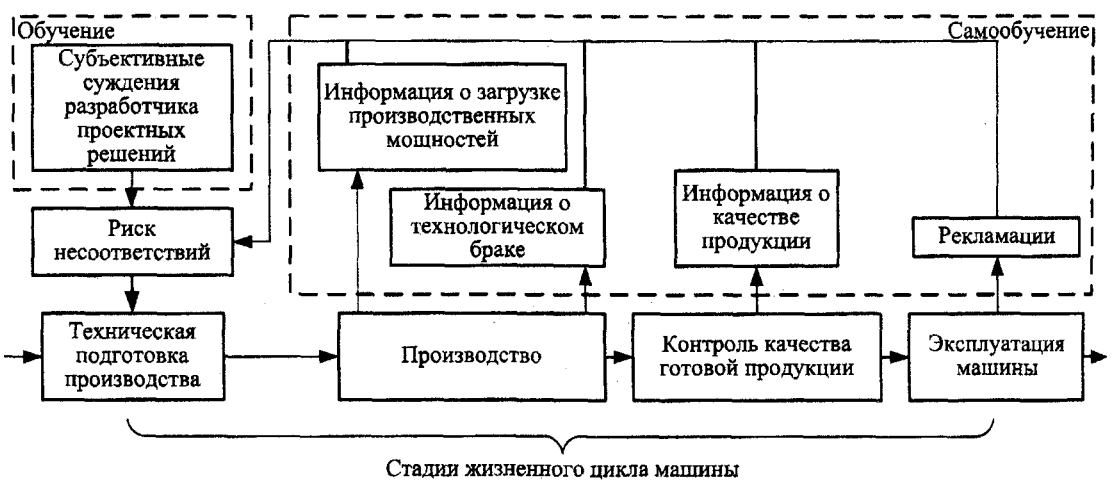


Рисунок 2 – Схема обучения и самообучения при корректировке содержания лингвистической переменной «Риск несоответствий»

После генерации множества маршрутов движения предметов труда по цехам предприятия решается задача формирования производственным подразделениям машинокомплектов с целью обеспечения их равномерной загрузки и снижения риска выпуска несоответствующей продукции. Критериями рационального распределения машинокомплектов по цехам и участкам является степень и равномерность их загрузки текущими работами, так как неравномерная загрузка цехов и участков ведет к нарушению ритмичности производственного процесса и, как следствие, к неполному использованию производственной мощности и ресурсов предприятия и снижению качества выпускаемой продукции.

Формирование машинокомплектов производственных подразделений предприятия осуществляется в соответствии с целевой функцией

$$F(x)=\sum_{j=1}^{M}\left(1-\frac{T_{\text{мк}j}}{h_j}\right)=\sum_{j=1}^{M}\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{N}d_i t_{ij}x_{ij}}{h_j}\right)\rightarrow \min, \qquad (3)$$

где M – количество производственных подразделений; $T_{\text{мк}j}$ – трудоемкость изготовления машинокомплекта; N– количество наименований комплектуемых объектов; d_i– объем выпуска предметов труда; t_{ij} – трудоемкость изготовления i-го объекта в j-м подразделении; x_{ij}– булева переменная, определяющая принадлежность i-го объекта к j-му подразделению; h_j– эффективный фонд времени подразделения.

Рассматриваемая задача относится к категории линейных дискретных задач распределения ресурсов. Ее решение осуществляется с помощью алгоритма на основе метода градиентно-случайного поиска оптимума целевой функции, позволяющего с достаточно высокой степенью точности и при относительно невысокой сложности алгоритма находить предпочтительное решение.

Квалиметрическая оценка технологичности машинокомплекта определяется по ее важнейшей составляющей – трудоемкости изготовления машинокомплекта $T_{\text{îê}}$, включающей трудоемкости t_i изготовления N предметов труда, составляющих данный машинокомплект. Трудоемкость изготовления предмета труда на этапе конструкторско-технологической подготовки производства определяется методом регрессионного анализа, основанного на получении математических зависимостей трудоемкости изготовления от различных параметров предметов труда. В общем виде процесс квалиметрической оценки технологичности машинокомплекта представлен на рисунке 3.

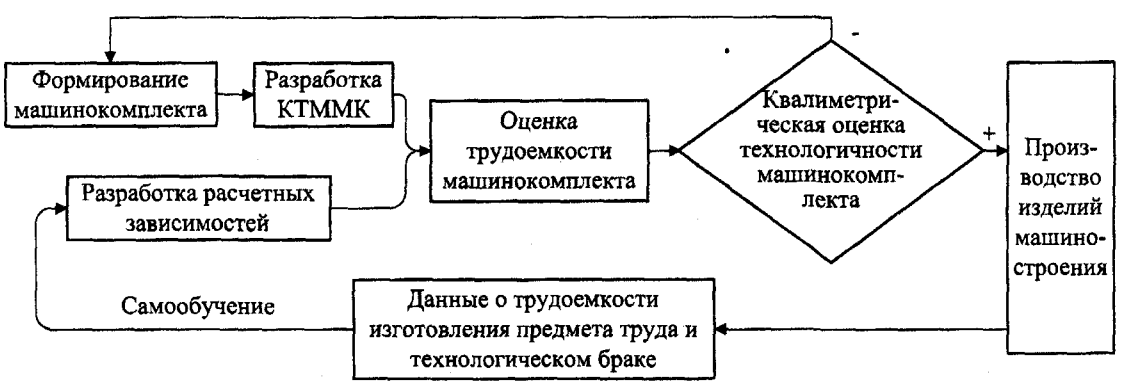


Рисунок 3 – Общая структура процесса квалиметрической оценки технологичности машинокомплекта

С помощью метода экспертных оценок были установлены следующие параметры предметов труда, оказывающие наибольшее влияние на трудоемкость их изготовления: ква-

литет точности, шероховатость поверхностей, предельные отклонения размеров, габаритные размеры, масса, материал. Данные параметры предложено интегрировать в конструкторско-технологической модели машинокомплекта (КТММК), представляющей собой объединение конструкторско-технологических моделей предметов труда (КТМПТ), составляющих машинокомплект. При этом КТММК и КТМПТ представляют собой описания, включающие в себя конструктивные (геометрические) и технологические параметры предмета труда (рисунок 4):

$$МК = \{КТМПТ\} = \{\{МКТЭ, ЗАГ, ПТ\}\},$$

где МК – конструкторско-технологическая модель машинокомплекта; $КТМПТ = \{МКТЭ, ЗАГ, ПТ\}$ – множество конструкторско-технологических моделей предметов труда, составляющих машинокомплект; $МКТЭ = \{ОБР, V, ДПЭ\}$ – множество описаний конструктивно-технологических элементов (КТЭ) и их параметров; $ОБР = \{q_1, q_2, ..., q_m\}$ – множество вариантов обработки КТЭ; $V = \{W, D\}$ – геометрическое описание КТЭ; W – подмножество поверхностей, образующих КТЭ; $w_i \in W$, $w_i = \{S_i, P_i\}$; S – подмножество типов поверхностей; P – подмножество простейших геометрических объектов, образующих поверхность; D – подмножество размеров КТЭ; ДПЭ – множество дополнительных параметров КТЭ; $ЗАГ = \{G, М, Т\}$ – описание заготовки; $G = \{w_1, w_2, ...w_n\}$ – геометрическое описание КТЭ; М – тип материала; Т – вид исходной заготовки; ПТ – дополнительное описание предмета труда.

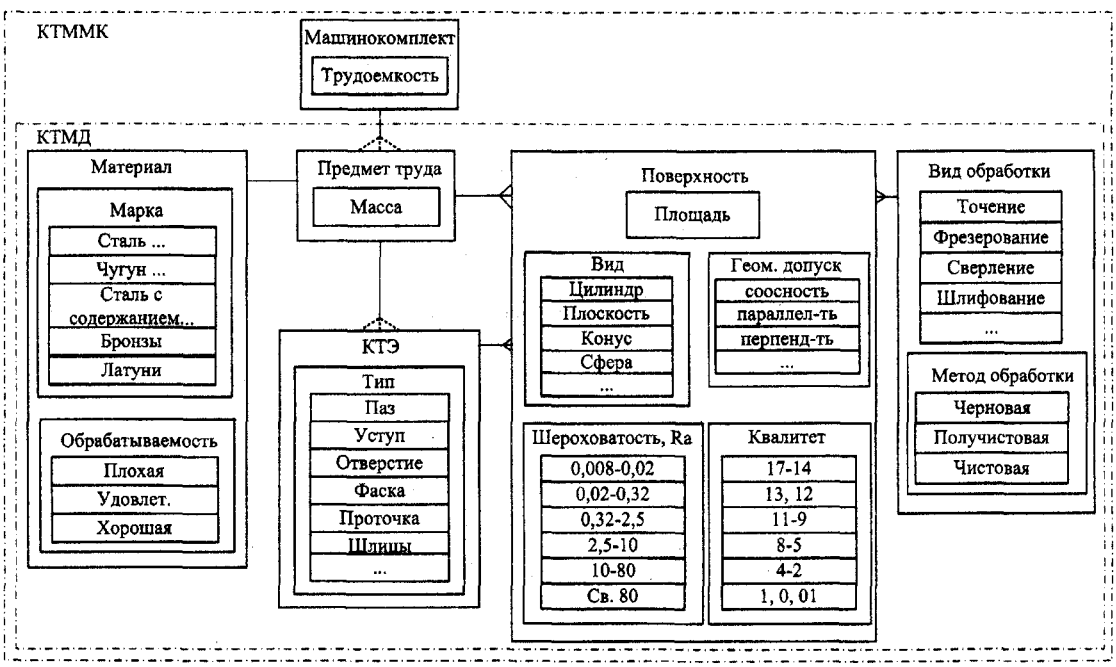


Рисунок 4 – Семантическая модель машинокомплекта производственного подразделения

Конструкторско-технологическая модель машинокомплекта позволяет классифицировать и кодировать составляющие его предметы труда, что позволяет сопоставить им регрессионные уравнения и провести расчет трудоемкости изготовления. Математическая модель трудоемкости T представлена системой степенных регрессионных уравнений вида

$y = a_0 \cdot \prod_{l}^{L} x_l^{b_l}$, где a_0 и b_l – коэффициенты, подлежащие определению экспериментальным путем:

$$\begin{cases} T = \sum_{j=1}^{N} F(M_j, K_j); \\ K_j = \sum_{i=1}^{n} f(S_i, Ra_i, t_i), \end{cases}$$

где N – число предметов труда, составляющих машинокомплект; M_j – масса j-го предмета труда; K_j – оценочная функция конструктивной формы j-го предмета труда; n – число различных КТЭ и поверхностей предмета труда; S_i – площадь обрабатываемой i-й поверхности; Ra_i – требуемая шероховатость i-й поверхности; t_i – допуск (квалитет точности) i-й поверхности.

Предварительное обучение регрессионной математической модели трудоемкости машинокомплекта было проведено на основе серии виртуальных экспериментов по моделированию механической обработки различных КТЭ и поверхностей предметов труда с определением требуемого времени обработки. При этом были определены значения коэффициентов уравнений регрессии в зависимости от конструкторско-технологических параметров КТЭ и поверхностей предметов труда.

Квалиметрическая оценка технологичности машинокомплекта на основе его конструкторско-технологической модели и технологического классификатора предусматривает выполнение двух циклов для каждого предмета труда и входящих в него КТЭ или поверхностей в отдельности. При этом циклически формируется технологический код КТЭ или поверхности, по которому из базы регрессионных уравнений выбирается соответствующее уравнение и выполняется расчет трудоемкости ее обработки. Трудоемкость изготовления предмета труда определяется суммированием трудоемкостей обработки составляющих его КТЭ и поверхностей, а трудоемкость изготовления машинокомплекта, на основе которой формируется квалиметрическая оценка его технологичности, – суммированием трудоемкостей составляющих его предметов труда.

Для практической реализации представленного подхода разработаны автоматизированные системы межцеховой технологической маршрутизации, регистрации и анализа информации о технологическом браке, квалиметрической оценки технологичности машинокомплектов производственных подразделений.

Автоматизированная система межцеховой технологической маршрутизации практически реализует принципы проектирования рациональных межцеховых технологических маршрутов и формирования машинокомплектов подразделений на этапе технологической подготовки машиностроительного производства. Данная автоматизированная система разработана на основе технологии реляционных баз данных, объектно-ориентированного анализа и программирования.

Она может использоваться для проектирования и изменения межцеховых технологических маршрутов с использованием функций заимствования проектных решений и справочников нормативных документов. С помощью данной системы также возможно ведение иерархически структурированного банка технологических проектных решений с целью хранения параметров разрабатываемых межцеховых технологических маршрутов и обеспечения проведения оперативного поиска и заимствования разработанных ранее технологических маршрутов.

Промышленная реализация автоматизированной системы межцеховой технологической маршрутизации обеспечила информационное взаимодействие технологов со специали-

стами других профессиональных групп, участвующих в управлении качеством продукции. С этой целью был проведен анализ около 24,5 тыс. межцеховых технологических маршрутов, реализуемых при производстве запорной арматуры для нефтяных и газовых трубопроводов в ЗАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин Тульской обл.), что позволило выявить характер влияния загруженности производственных подразделений на качество выпускаемой продукции.

Автоматизированная система регистрации и анализа информации о технологическом браке обеспечивает оперативное выявление причин и мест возникновения брака в производственном процессе и адекватное реагирование системы менеджмента качества предприятия в случае возникновения систематических несоответствий параметров производственного процесса техническим требованиям, установленным в конструкторско-технологической и нормативной документации. На основании учета данных о технологическом браке в различных производственных подразделениях предприятия и напряженности производственных заданий в них, а также неформальных субъективных суждений разработчиков проектных решений о качестве выпускаемой продукции в том или ином подразделении, непрерывно в режиме самообучения уточняется вид функций принадлежности нечетких множеств, описывающих значения лингвистической переменной «Риск несоответствий».

Автоматизированная система квалиметрической оценки технологичности машинокомплектов производственных подразделений включает информационно-справочную систему обеспечения технологичности конструкции изделия и систему расчета трудоемкости его изготовления, реализованную как приложение САПР Компас-3D. Созданное программное обеспечение способствует повышению эффективности проведения операции технологического контроля в современных производственных условиях и также может быть использовано для обучения и повышения квалификации конструкторов и технологов.

Промышленная реализация представленных результатов осуществлена в производственных условиях ЗАО «Тяжпромарматура» при изготовлении запорной арматуры для нефте- и газопроводов. В результате применения представленной процедуры разработки рациональной организационно-технологической структуры производственного процесса изготовления машин на основе управления технологичностью машинокомплектов подразделений предприятия по критерию трудоемкости доведен до 99,9 % процент сдачи продукции с первого предъявления, на 47 % снизился удельный вес потерь от брака в себестоимости, процент рекламаций на выпускаемую продукцию снизился до 0,1 %.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев, Ю.Е. Оперативное планирование и организация ритмичной работы на промышленных предприятиях [Текст] Ю.Е. Звягинцев. – Киев: Тэхника, 1990. – 155 с.

2. Насретдинов, А.В. Проектирование организационно-технологических структур производственных систем механической обработки [Текст] / А.В. Насретдинов, И.Н. Пац, Е.В. Мешков. – Л.: Политехника, 1991. – 255 с.

Александр Николаевич Иноземцев
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
Тел: (4872) 35-18-87
E-mail: zem@tsu.tula.ru

Виталий Юрьевич Анцев
Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»
Тел: (4872) 33-22-88
E-mail: anzev@tsu.tula.ru

A.N. INOZEMTSEV, V.Y. ANTSEV

DEVELOPMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL STRUCTURE OF PRODUCTION PROCESS BASED ON QUALIMETRIC MEASUREMENT OF INTERPLAINT WORKFLOW

The solution of manufacturability control of machine parts in production unit based on compromise between intense of production objective which characterized by composition and labor content of machine parts and inapplicable machine production risk is represented.

Key words: *machien parts, interplaints manufacturing routing, qualimetric estimate, misfit risk, labor content*

BIBLIOGRAPHY

[1] Zvyagintsev, Y.E. On-line scheduling and setup of rhythmyc workon industrial enterprise [Text] / Y.E. Zvyagintsev. – Kiyiv: Technique, 1990. – 155 p.

[2] Nasretdinov, A.V. Organizational and technological structures of machine work manufacturing system design [Text] / A.V. Nasretdinov, I.V. Pats, E.V. Meshkov. – L.: Polytachnics, 1991. – 255 p.

Aleksandr Nikolaevich Inozemtsev
Doctor of Engineering, professor
Tula State University,
Tula
Phone: (4872)35-18-87
E-mail: zem@tsu.tula.ru

Vitaly Yuryevich Antsev
Doctor of Engineering, professor
Tula State University,
Tula
Phone: (4872)33-22-88
E-mail: anzev@tsu.tula.ru

УДК 371.261

А.В. КИРИЧЕК, А.В. МОРОЗОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛЯ В УСЛОВИЯХ РЫНКА ТРУДА

В статье описывается вариативная модель оценивания уровня социально-профессиональной конкурентоспособности молодого специалиста, основанная на федеральном государственном образовательном стандарте нового поколения для специальностей технического профиля, компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE, а также рейтинговой оценке вузов России, осуществляющих подготовку специалистов технического профиля.

Ключевые слова: *специалист, компетенция, федеральный государственный образовательный стандарт.*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка первого и второго модуля модели оценивания качества подготовки специалиста в соответствии с ФГОС нового поколения, требующей реализации схемы: ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИДАКТИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ → ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТА позволяет оценить как уровень каждой компетенции выпускника профессиональной школы в соответствии с ООП направления подготовки, так и уровень сформированности социально-профессиональных компетентностных кластеров [1]. Такая модель основывается на формализации информационных пространств, определенных федеральными государственными образовательными стандартами нового поколения, путем построения аксиоматического базиса квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности специалиста [3].

Дальнейшая разработка модели оценивания качества подготовки специалиста реализует этап перехода от кластеризации компетенций специалиста с учетом компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE к модели оценивания приведенных показателей профессиональной компетентности молодых специалистов получивших образование одинакового профиля в разных вузах на межрегиональном рынке труда [4].

АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА

Пусть p-ый объект обладает множеством знаний, полученных в результате освоения системы дидактических единиц D_i, $i=\overline{1:n}$, и отображается в n-мерном информационном пространстве N точкой $N_p\left(q_{p1};q_{p2};\dots q_{pr};\dots;q_{pn}\right)$; совокупный уровень освоения учебной дисциплины A_j, $j=\overline{1:m}$, определяется подмножеством дидактических единиц $D_{jg}\subset\{D_i\}, i=\overline{1:n}$, $g=\overline{1:t}$, и матрица соответствия устанавливает, что компетенция B_k, $k=\overline{1:l}$, формируется при реализации подмножества образовательных курсов учебных дис-

циплин. Принципиально важным является тот факт, что любая дисциплина A_j оказывает различное влияние на каждую компетенцию B_k, в формировании которой она участвует (рисунок 1).

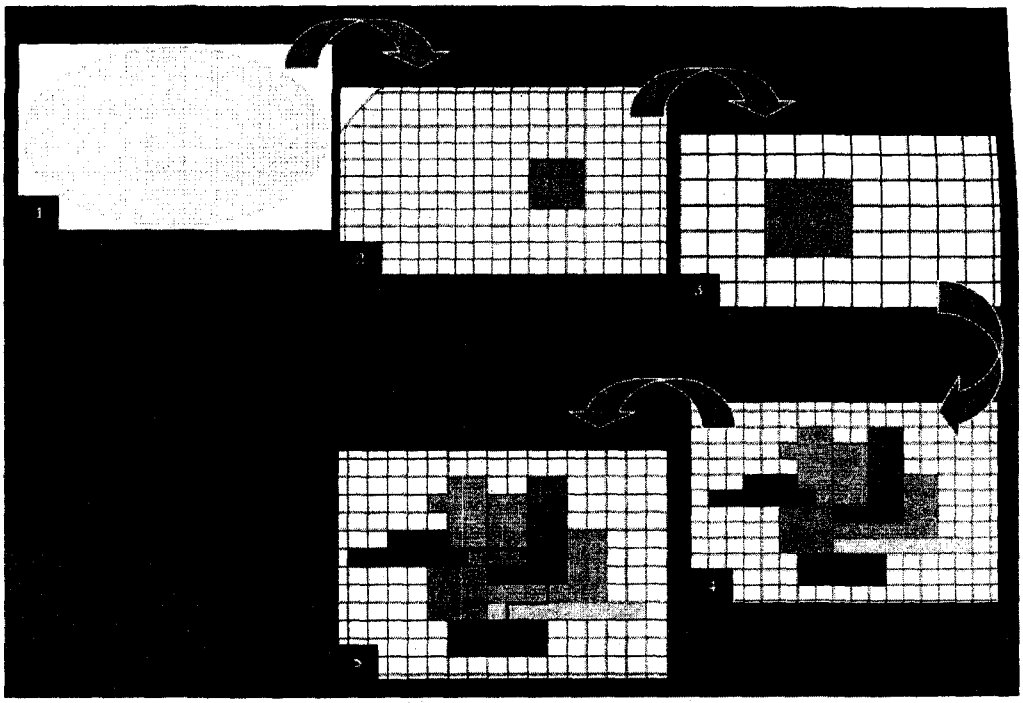


Рисунок 1 – Модель формирования подпространства компетенции B_k, $k=\overline{1:l}$, специалиста на основе подмножества нескольких учебных дисциплин A_j, формируемых на базе информационных пространств множества дидактических единиц

Пусть p-ый объект имеет уровни сформированности компетенций $B_1, B_2, ..., B_k, ..., B_l$, характеризуемые показателями $H_{p1}, H_{p2}, ..., H_{pk}, ..., H_{pl}$. Кроме того, в рамках ООП направления подготовки специалиста задается система пороговых H_k^{min}, продвинутых H_k^{v} и высоких H_k^{w} уровней их сформированности, где $k=\overline{1:l}$. Тогда полная компетенциограмма специалиста будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

Сравнительный анализ компетентностной модели специалиста, построенной в рамках ФГОС ВПО направлений подготовки специалистов технического профиля, и компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования, а также требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE позволяет сделать вывод о целесообразности формирования вторичной группировки компетенций в систему компетентностных кластеров $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ «Знания и понимание», «Инженерный анализ», «Инженерное проектирование», «Инженерная практика», «Исследования» и «Личностные навыки».

Если в формировании компетентностного кластера K_i, где участвует подмножество компетенций $B_{k'}$, $k'=\overline{1:l'}$, то для p-го объекта можно рассчитать уровень сформированности T_{pi} компетентностного кластера K_i

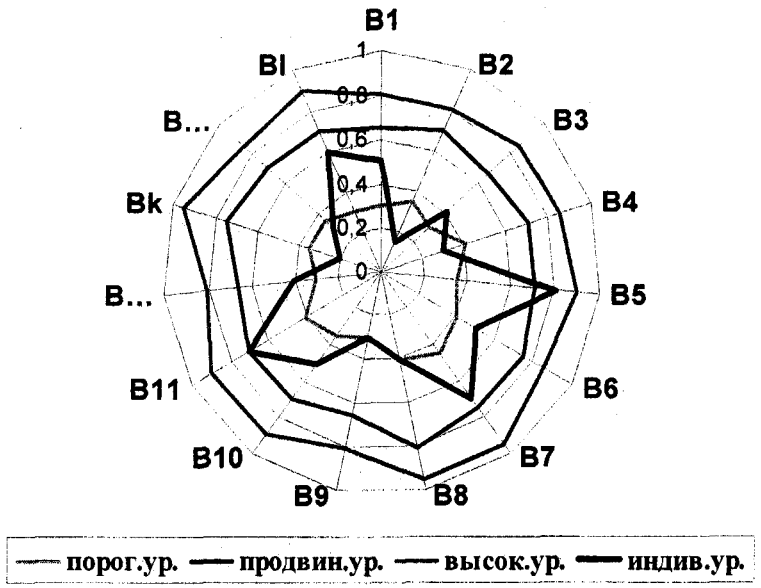


Рисунок 2 – Полная компетенциограмма специалиста (образец) – плоскостная уровневая модель системы компетенций специалиста

Если учесть, что для уровня сформированности T_{pi} компетентностного кластера K_i установлен пороговый уровень $T_i^{\min}$, продвинутый уровень T_i^v и высокий уровень T_i^w, то можно ввести условный ранг уровневой компетентностной кластеризации t_{pk} в виде:

$$u_{pi} = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad 0 \le T_{pi} \prec T_i^{\min}; \\ 1, & \text{если } T_i^{\min} \le T_{pi} \prec T_i^v; \\ 2, & \text{если } T_i^v \le T_{pi} \prec T_i^w; \\ 3, & \text{если} \quad T_i^w \le T_{pi} \le 1; \end{cases} \qquad (1)$$

Если рассматривать все множество компетентностных кластеров K_i, $i = 1, ..., 6$, то для ее геометрической интерпретации целесообразно использовать плоскостную модель в форме лепестковой диаграммы, которую можно интерпретировать как «кластерная компетенциограмма» (рисунок 3).

Кроме того, полученная кластерная компетенциограмма специалиста позволяет решить и вопрос о нахождении обобщенного параметра Z_p, характеризующего индивидуальный уровень сформированности профессиональной компетентности, которым обладает p-й объект в условиях вуза.

Так как на формирование компетентности специалиста Z_p оказывают влияние все множество компетентностных кластеров K_i, $i = 1, ..., 6$, то для p-го объекта индивидуальный уровень сформированности Z_p профессиональной компетентности специалиста можно охарактеризовать несколькими методами:

- по уровню достижения максимального значения среди всех имеющихся индивидуальных уровней сформированности компетентностных кластеров K_i, $i = 1, ..., 6$, т.е.:

$$Z_p = \max\{T_i; \quad i = \overline{1:6}\} \qquad (2)$$

- по уровню достижения минимального значения среди всех имеющихся индивидуальных уровней сформированности компетентностных кластеров K_i, $i = 1, ..., 6$, т.е.:

$$Z_p = \min\{T_i; \quad i = \overline{1:6}\} \tag{3}$$

- по уровню достижения среднего значения среди всех имеющихся индивидуальных уровней сформированности компетентностных кластеров K_i, $i = 1, ..., 6$, т.е.:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^{6} T_i}{6} \tag{4}$$

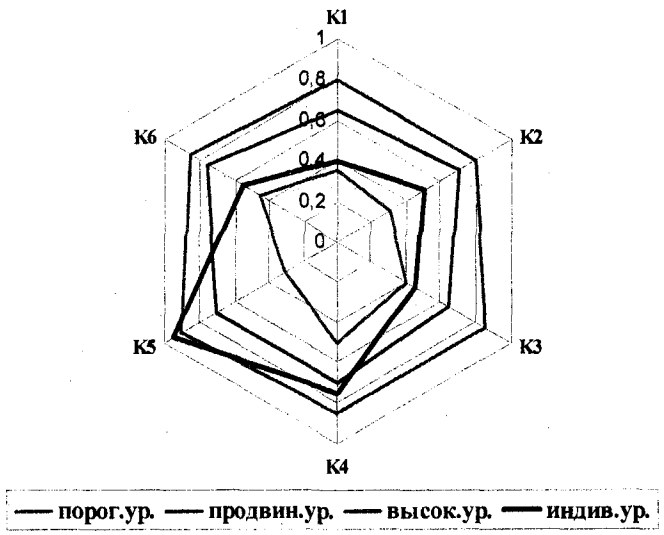


Рисунок 3 – Кластерная компетенциограмма специалиста (образец) – плоскостная уровневая модель системы кластеров компетенций специалиста (в соответствии с компетентностной моделью системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE)

Таким образом, решается вопрос об определении функциональной зависимости между уровнем сформированности профессиональной компетентности Z_p, которым обладает p-й объект, и совокупным количеством его знаний по учебным дисциплинам Y_p в виде $Z_p = \Phi(Y_p)$ посредством кластеризованной совокупности K_i, $i = 1, ..., 6$.

Проведенный анализ показывает, что индивидуальный уровень сформированности профессиональной компетентности Z_p, которым обладает p-й объект, и который рассчитывается по формуле (4), отражает компетентностные характеристики p-го объекта без учета факторов влияния внешней среды близкодействия, т.е. специфики влияния внутреннего социокультурного поля вуза. Если сравниваются между собой объекты, принадлежащие к одной социокультурной группе (например, выпускники, освоившие ООП одного направления подготовки специалистов в рамках одного вуза), то показатель Z_p позволит провести сравнительный анализ и кластерных компетенциограмм специалистов, и уровня сформированности социально-профессиональной конкурентоспособности выпускников в рамках одного вуза. Поэтому показатель Z_p можно еще характеризовать и как внутривузовский.

Если же сравниваются между собой объекты, в отношении которых процесс профессиональной социализации реализовывался в разных социокультурных пространствах (например, выпускники, освоившие ФГОС ВПО одного направления подготовки специалистов,

но окончившие разные вузы), то показатель Z_p следует скорректировать (с учетом основных показателей, характеризующих результативность деятельности образовательного учреждения) коэффициентом ранговой конкурентоспособности вуза k_v. Таким образом, можно говорить о приведенном показателе профессиональной компетентности специалиста, который характеризует специалиста как субъекта межрегионального рынка труда [2]:

$$\tilde{Z}_p = k_v \cdot Z_p \qquad (5)$$

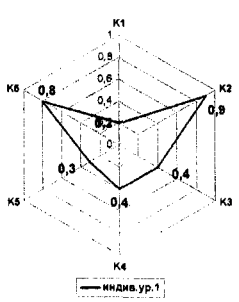
С использованием показателей $T_{p1}, T_{p2}, ..., T_{p6}$, характеризующих для p-го объекта уровни сформированности компетентностных кластеров $K_1, K_2, ..., K_6$, можно также построить и приведенную кластерную компетенциограмму специалиста, в которой кластеры $K_1, K_2, ..., K_6$ характеризуются уже приведенными значениями $k_v \cdot T_{p1}$, $k_v \cdot T_{p2}, ...,$ $k_v \cdot T_{p6}$. Если учесть, что в этом случае вуз не меняет систему пороговых $T_i^{\min}$, продвинутых T_i^{v} и высоких T_i^{w} уровней сформированности компетентностных кластеров $K_1, K_2, ..., K_6$ (они устанавливаются для реализации ООП), то часть объектов может «выйти из зоны благополучия», т.к. приведенное значение может удовлетворять условию: $k_v \cdot T_{p_i} \le T_i^{\min}$.

При этом особое значение приобретает вопрос о методике определения коэффициента ранговой конкурентоспособности вуза k_v. Так как этот коэффициент отражает специфику формирования социокультурного поля вуза, в рамках которого реализуется конкретный ФГОС ВПО направления подготовки специалистов, то, по-нашему мнению, его целесообразно связать в рейтингом профильных вузов, формируемым Министерством образования и науки на основании официальных данных формы 2НК [5]. При составлении такого рейтинга учитывается множество параметров: состав и качество профессорско-преподавательского состава, количество студентов разных форм обучения, наличие студентов из других стран, объем проведенных научных исследований, издательская деятельность, обеспечение студентов общежитиями и др. Подсчет итоговых результатов проводится с учетом филиалов вузов.

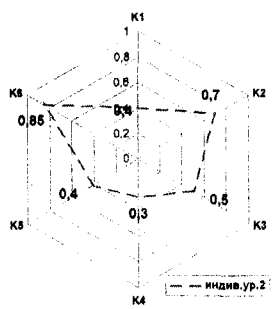
Пример

Пусть два молодых специалиста, субъекты рынка труда p_1 и p_2, системы компетенций которых характеризуются двумя различными видами кластерных компетенциограмм, получили образование в условиях двух различных вузов А (из региона X) и В (из региона Y), которые по итогам деятельности за θ год имеют коэффициенты ранговой конкурентоспособности вуза k_{v_1} и k_{v_2}. Тогда сравнительный анализ уровней сформированности социально-профессиональной компетентности двух молодых специалистов можно провести по следующей схеме:

- построение индивидуальных кластерных компетенциограмм молодых специалистов, субъектов рынка труда p_1 и p_2 (рисунок 4);



а) p_1-й субъект рынка труда



б) p_2-й субъект рынка труда

Рисунок 4 – Индивидуальные кластерные компетенциограмы двух субъектов рынка труда

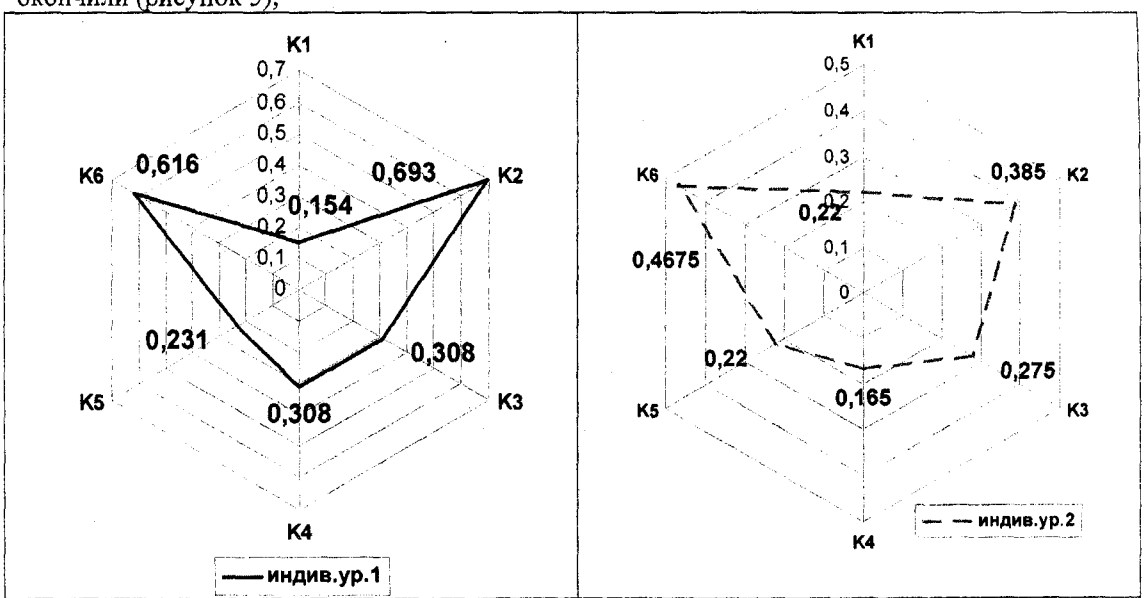
- расчет значений Z_{p_1} и Z_{p_2} внутривузовского индивидуального показателя уровня сформированности компетентности молодых специалистов; получим (при использовании данных примера):

$$Z_{p_1} = 0{,}5 \quad \text{и} \quad Z_{p_2} = 0{,}525 \tag{6}$$

- определение коэффициенты ранговой конкурентоспособности вуза k_{v_1} и k_{v_2} на основании справочных статистических данных [5]; пусть (данные за 2010 год для k_{v_1} - вуз А из региона X; для k_{v_2} - вуз В из региона Y):

$$k_{v_1} = 0{,}77 \text{ и } k_{v_2} = 0{,}55 \tag{7}$$

- построение приведенных кластерных компетенциограмм молодых специалистов с учетом коэффициентов ранговой конкурентоспособности вузов k_{v_1} и k_{v_2}, которые они окончили (рисунок 5);



а) p_1-й субъект рынка труда | *б) p_2-й субъект рынка труда*

Рисунок 5 – Приведенные кластерные компетенциограмы двух субъектов рынка труда
(внимание - субъект p_1 вышел из «зоны благополучия» - по одному из кластеров значение уровня его компетентности ниже минимально допустимого, хотя в рамках ООП, реализуемой в данном вузе, он успешно окончил вуз и является дипломированным специалистов)

- расчет приведенных показателей профессиональной компетентности молодых специалистов $\widetilde{Z}_{p_1}$ и $\widetilde{Z}_{p_2}$ проводится по формуле (5) на основе приведенных значений $k_v \cdot T_{p1}$, $k_v \cdot T_{p2}, \ldots$, $k_v \cdot T_{p6}$, характеризующих для p_1-го и p_2-го объектов уровни сформированности компетентностных кластеров $K_1, K_2, \ldots, K_6$:

$$\widetilde{Z}_{p_1} = 0{,}30; \qquad \widetilde{Z}_{p_2} = 0{,}16 \tag{8}$$

- построение сравнительной приведенной кластерной компетенциограмы молодых специалистов, что позволяет в отношении одного из них сделать вывод о приоритетности его уровня сформированности системы профессиональных компетенций при приеме на вакантное рабочее место (рисунок 6):

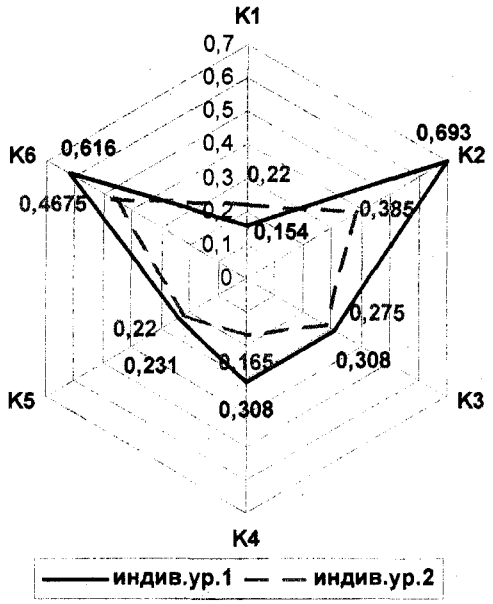


Рисунок 6 – Сравнительная приведенная кластерная компетенциограмы двух субъектов рынка труда *(внимание – при приеме на работу приоритет следует отдать субъекту* p_1*, т.к. из (8)* $\widetilde{Z}_{p_2} \le \widetilde{Z}_{p_1}$*, хотя индивидуальные значения внутривузовского индивидуального показателя уровня сформированности компетентности молодых специалистов оставляли приоритет за субъектом* p_2*, т.к. из (6)* $Z_{p_1} \le Z_{p_2}$*)*

ВЫВОД

Модель многоуровневого долевого оценивания профессиональной компетенций специалиста является компонентом теоретико-методологического обеспечения процедуры оценивания социально-профессиональной конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда с применением автоматизированной системы «Кадровая квалиметрия специалиста».

Кроме того, предложенная модель может использоваться для процедуры оценивания качества подготовки специалистов при реализации ФГОС ВПО экономического, гуманитарного и др. профилей подготовки. В этом случае система кластеров будет формироваться, исходя из специфики профессиональной деятельности специалистов этих профилей.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова, А.В. Квалиметрическая оценка уровня социально-профессиональной конкурентоспособности выпускников на региональном рынке труда [Текст] / А.В. Морозова // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. - № 1/265(531). – С. 147-155.

2. Морозова, А.В. Мультипликативная модель конкурентных преимуществ специалиста машиностроительного профиля [Текст] / А.В. Морозова // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2008. - № 2. – С. 62-66.

3. Киричек, А.В. Аксиоматический базис квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности молодого специалиста [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 13. - 2011. - № 4(4). - С. 1232-1235.

4. Морозова, А.В. Методологические основы формирования модели квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 1(291). – С.69-81.

5. Рейтинг технических вузов 2011 года Министерства образования и науки Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://e-educ.ru/234-novyy-reyting-ministerstva-obrazovaniya-i-nauki-rossiyskoy-federacii.html

Андрей Викторович Киричек
Госуниверситет - УНПК, г Орел
доктор технических наук, профессор, директор Технологического института
тел./ fax (4862)555524
E-mail: avk@ostu.ru

Анна Валентиновна Морозова
Кандидат социологических наук
Заместитель директора по НИР
Технологического института им. Н.Н. Поликарпова
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»
Тел.: (4862) 555524
E-mail: niotiostu@gmail.com

A.V. KIRICHEK, A.V.MOROZOVA

THE MACHINE-BUILDING CROSS-SECTION SPECIALIST'S COMPETITIVENESS SOCIALLY-PROFESSIONAL LEVEL ESTIMATION PROCEDURE MODELLING

In article a socially-professional competitiveness level estimation alternative model of the young specialist, based on the federal state educational standard of new generation for technical cross-section specialities, system of the engineering education and requirements of the European system of engineering programs EUR-ACE accreditation European standards, and also a rating estimation of high schools of Russia which is carrying out preparation of experts of a technical cross-section competence model is described.

Keywords: *the specialist, the competence, the federal state educational standard.*

BIBLIOGRAPHY

[1] Morozova, A.V. A graduates socially-professional competitiveness level qualimetry estimation on a regional labour market [Text] / A.V.Morozova//Izvestija OrelSTU. A series Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2007. - № 1/265 (531). – p. 147-155.

[2] Morozova, A.V. The machine-building cross-section specialists competitive advantages multiplicate model [Text] / A.V.Morozova//Izvestija OrelGTU. A series Fundamental and applied problems of technics and technology – 2008. - № 2. – p. 62-66.

[3] Kirichek, A.V. The young expert socially-professional competence qualimetry multidimensional model axiomatic basis [Text] / A.V.Kirichek, A.V.Morozova//News of the Samara center of science of the Russian Academy of Sciences. Volume 13. - 2011. - № 4 (4). - p. 1232-1235.

[4] Morozova, A.V. The specialists in machine-building manufacture competence estimations qualimetry model formation methodological basis//Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2012. – № 1 (291). – p.69-81.

[5] A rating of technical colleges in 2011 by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation [the Electronic resource]. – an access Mode: *http://e-educ.ru/234-novyy-reyting-ministerstva-obrazovaniya-i-nauki-rossiyskoy-federacii.html*

Andrey Viktorovich Kirichek
Doc. Sc. tech., Prof.
Federal State Budget Educational Institution of Higher Vocational Training "State University – Educational Scientific Production Complex", Orel
Phone:(4862) 55-55-24
E-mail: ti@ostu.ru

Anna Valentinovna Morozova
Can.Sc. soc.,
Deputy Director of the Institute for scientific research works
Polikarpov Technological Institute
FSBEI HVT «State University – ESPC»
Tel.: (4862) 555524
E-mail: niotiostu@gmail.com

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
Алисова М.В., Тарасов Д.Е.
Компьютерная верстка
Алисов А.А.

Подписано в печать 27.02.2012 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,1.
Тираж 600 экз.
Заказ № 172/12/71

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.