

Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор
В.Л. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:
Бучаченко А.Л.
Гусев А.А.
Дегтярев Ю.И.
Елисеев В.А.
Иванов А.П.
Мальцева С.В.
Нефедов Е.И.
Шебалин И.Ю.
(заместитель главного редактора)

4
—
2013

УЧРЕДИТЕЛИ:
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

Журнал зарегистрирован 9 апреля
1999 г. за № 018684 в Комитете
Российской Федерации по печати

Журнал входит в перечень
утверждённых ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей
учёных степеней

ООО «Издательство Машиностроение»

РЕДАКЦИЯ:

Шебалин И.Ю. — зам. главного редактора
Осипова В.Г. — научный редактор
Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 748 0290,
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 268 3858,
факс: (499) 269 4897

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальные исследования характеристик амальгамных ламп	3
Мартынов В.В., Мартынов П.В. Прогнозирование износа режущего инструмента методом экстремального критерия	7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Васин В.А., Ивашов Е.Н., Корпачёв М.Ю., Костомаров П.С., Степанчиков С.В. Многокритериальная задача принятия решения при проектировании УФ-литографического модульного оборудования	19
Великанов В.Б., Денисов Ю.В., Нефедов А.Ю., Пахомов И.И. Технологические аспекты производства деталей прецизионных приборов	24
Дьяков И.Ф., Попович А.В. Интеграция интеллектуальных алгоритмов в CAM-системы	31
Тамarkin М.А., Тищенко Э.Э., Тихонов А.А. Повышение эффективности технологических процессов гидроабразивной обработки	35
Кузина В.В., Кошев А.Н. Разработка автоматизированной системы управления и контроля над состоянием водной среды региона	44

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. Experimental study of the amalgam lamps characteristics	3
Martynov V.V., Martynov P.V. Cutting tool wear prediction through the use of extreme criterion method	7

MODERN TECHNOLOGIES

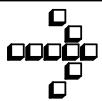
Vasin V.A., Ivashov E.N., Korpachev M.Yu., Kostomarov P.S., Stepanchikov S.V. Multicriterial decision making problem in the design of the UV-lithography equipment unit	19
Velikanov V.B., Denisov Yu.V., Nefedov A.Yu., Pakhomov I.I. Technological aspects of the precision device details production	24
Dyakov I.F., Popovich A.V. Intellectual algorithms integration in the CAM-systems	31
Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tikhonov A.A. Technological processes efficiency increase of the hydroabrasive processing	35
Kuzina V.V., Koshev A.N. Designing of the automatic control and management system over a region water environment condition	44

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу: (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 6600, 269 5298

Сдано в набор 28.01.13. Подписано в печать 28.03.13.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Белый ветер»
115407, Москва, Нагатинская наб., 54

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель



УДК 921.327.534

С.А. Микаева, д-р, техн. наук, проф., **А.С. Микаева**
 (Московский государственный университет приборостроения и информатики)

mikaeva@pechkin.npo.lit.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АМАЛЬГАМНЫХ ЛАМП

Для дугового разряда в смесях аргон-неон при давлении 70–110 Па и парах ртути при давлении 10–15 Па получены вольт-амперные характеристики, зависимости электрической мощности, мощности ультрафиолетового излучения (254 нм) и коэффициента полезного действия генерации ультрафиолетового излучения от давления газа и разрядного тока в пределах 1,6–4,0 А. Дуговой разряд длиной 144 см зажигался в кварцевой трубке с внутренним диаметром 25 мм.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, вольт-амперные характеристики, амальгамные лампы.

Current-voltage characteristics and the electrical power, the ultraviolet radiation output (254 nm) and the ultraviolet radiation generation efficiency depending on the gas pressure and the discharge current in the range 1,6–4,0 A is derived for an arc discharge in the argon-neon mixtures at the pressure 70–110 Pa and mercury vapor at the pressure 10–15 Pa. The arc discharge of the length 144 cm was ignited in a quartz tube with the inner diameter 25 mm.

Key words: ultraviolet radiation, the current-voltage characteristics, amalgam lamps.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение диапазоном 205–315 нм используется для бактерицидной обработки воды, воздуха и поверхностей. На сегодняшний день наиболее эффективными и мощными источниками бактерицидного УФ излучения являются дуговые разряды в парах ртути и инертных газах. При давлении инертного газа в сотни Па и ртути около 10–15 Па более 95 % энергии излучения дугового разряда сосредоточено на длине волны 254 нм, которая находится в области длин волн, обладающих наиболее эффективным бактерицидным эффектом.

Коэффициент полезного действия (КПД) преобразования электрической энергии в энергию бактерицидного УФ излучения дуги низкого давления составляет 30–50 %. Дуговой разряд при высоком давлении паров ртути (10^3 – 10^5) Па имеет низкий КПД в области бактерицидного УФ излучения (15 %), а с учётом кривой бактериальной эффективности это значение снижается до 10–11 %. Если в лампах с дугой низкого давления в качестве источника паров ртути используются капельки металлической ртути, то погонная мощность такой лампы не превышает 50 Вт/м, так как при более высокой мощности из-за теплового нагрева стенки лампы давление паров ртути быстро нарастает, что приводит к резкому сниже-

нию КПД. При более высоких мощностях используется амальгама [1], позволяющая поддерживать оптимальную плотность паров ртути в некотором диапазоне температур на стенке лампы и не являющаяся экологически опасной.

Для обеззараживания воды в больших объёмах требуются УФ лампы с КПД более 40 % и погонной мощностью 200–400 Вт/м. При повышении мощности повышается плотность тока разряда, уменьшается напряжённость электрического поля в разряде и уменьшается КПД. Разработанные в настоящее время бактерицидные лампы имеют мощность 100–150 Вт/м и наполнены аргоном или смесью инертных газов (чаще всего неона и аргона) при давлении 200–700 Па. Более низкие давления не использовались из-за резкого уменьшения ресурса работы применяемых оксидных электродов и снижения мощности УФ излучения при длительной работе лампы. Разработанная технология защиты кварцевой стенки при нанесении защитного слоя из оксидов редкоземельных металлов позволяет решить проблему с ресурсом работы лампы при пониженных давлениях. Известно [1], что при давлениях инертного газа в сотни Па наблюдается увеличение КПД при понижении давления и увеличение напряжённости электрического поля. Однако для дав-

лений ниже 150 Па такие данные отсутствуют. Следует отметить, что до недавнего времени для питания мощных газоразрядных УФ ламп преимущественно использовалось сетевое напряжение с частотой 50–60 Гц, а стартёрная схема с дросселем ограничивала разрядный ток. При таких условиях дуговой разряд гаснет и зажигается каждый полупериод, что негативно оказывается на сроке службы оксидного катода и появляется пульсация излучения. В последние годы для питания газоразрядных ламп применяют электронные источники с частотой разрядного тока до нескольких десятков кГц, что исключает перезажигание разряда.

При разработке газоразрядных ламп, рассчитанных на погонные мощности от 150 до 400 Вт/м при разрядных токах от 1,5 до 5,0 А, приходится уделять много внимания оптимизации газового наполнения лампы и разрядного тока. С одной стороны, использование в серийных газоразрядных лампах низкого давления аргоновых наполнений с давлениями 200–700 Па обеспечивает достаточный срок службы лампы. С другой стороны, при использовании более низких давлений и лёгких газов можно сконструировать более мощные и эффективные газоразрядные источники, хотя есть вероятность того, что они будут обладать менее высоким сроком службы из-за быстрого износа оксидного катода. Ситуацию затрудняет и то, что в литературе отсутствуют данные по свойствам дугового разряда при давлениях ниже 150 Па, необходимые для разработки мощных источников УФ излучения.

Цель настоящей работы – это экспериментальное исследование характеристик мощных амальгамных ламп с дугой низкого давления в смесях неон–argon при общем давлении смеси от 70 до 110 Па. Содержание неона в смеси варьировалось от 30 до 60 %. Экспериментальные лампы изготовлены из кварцевых трубок с внутренним диаметром 25 мм и внешним 28 мм. Для снижения влияния плазмы на кварцевое стекло внутренняя поверхность трубок покрывалась защитным слоем из оксидов металлов. В торцах трубы размещались трисpirальные оксидные электроды, межэлектродное расстояние составляло 144 см, что с учётом конструкции электродного узла и цоколей позволяло выдержать общую длину лампы 160 см. В процессе изготовления лампы проходили вакуумную обработку, направленную на очистку поверхностей кварцевой колбы и электрода от посторонних примесей. В качестве источника ртути применялась двухкомпонентная амальгама индия. Лампы были изготовлены с использованием трёх видов газовых смесей: 30 %Ne/70 %Ar (далее 30/70), 40 %Ne/60 %Ar(40/60), 60 %Ne/40 %Ar (60/40). Для заполнения применялись особо чистые смеси.

Для измерений параметров лампы помещались в закрытый короб, в котором организована принудительная циркуляция воздуха и нагрев для обеспечения равномерной температуры воздуха по всему объёму в диапазоне от 20 до 60 °С. При изменении мощности УФ излучения ламп температура на поверхности колбы также изменяется, а давление ртути может отклоняться от оптимального значения. Температура в коробе выбиралась таким образом, чтобы мощность УФ излучения была максимальна. Ток разряда поддерживался электронным источником питания, позволяющим стабилизировать разрядный ток от 1,6 А до 4,0 А на частоте от 35 до 75 кГц. Напряжение на лампе и разрядный ток измерялись анализатором мощности YOKOGAWA PZ4000 (Япония). Данный прибор позволяет проводить любые вычисления (например, определить мгновенную мощность, рассеиваемую на разряде). Данные автоматически усредняются с получением среднеквадратичных значений. Относительная погрешность измерения разрядного тока не превышает 2 %, а напряжения 0,5 %. Погрешность расчёта электрической мощности лампы составляет не более 2 %. Мощность УФ излучения измерялась калиброванным фотоэлементом Ф29 и универсальным вольтметром Щ31.

Для исследуемых ламп получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рис. 1) и зависимости рассеиваемой на лампе мощности от разрядного тока (рис. 2). Вид ВАХ монотонно падающий, напряжение снижается на разрядном промежутке при увеличении разрядного тока. Вид полученных зависимостей согласуется с приведёнными в работе [2] ВАХ ламп с аргоновым наполнением при давлениях больше 150 Па и разрядных токах до 3,0 А. Падение напряжения на лампе с ростом разрядного тока можно объяснить тем, что с увеличением тока концентрация электронов возрастает, увеличиваются столкновения электронов с атомами инертного газа и ртути, и, соответственно, понижается электронная температура. Увеличивается количество ионизаций в расчёте на один электрон, в то время как скорость потерь заряженных частиц на стенке не изменяется, так как она определяется диффузными процессами, зависящими от геометрии разрядной трубы и газового наполнения. Таким образом, электронная температура, требуемая для поддержания скорости ионизации, равной скорости исчезновения зарядов, падает с увеличением тока, а следовательно, падает и напряжение, требуемое для обеспечения данной температуры электронов. Однако, несмотря на падение напряжения с ростом разрядного тока, при любом из рассмотренных наполнений наблюдается увеличение электрической мощности разряда с ростом раз-

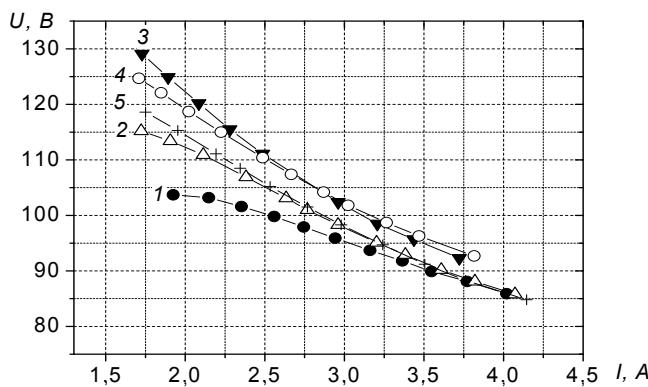


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ламп с разным наполнением:

1 – 110 Па 30/70; 2 – 85 Па 40/60; 3 – 85 Па 60/40; 4 – 70 Па 40/60; 5 – 70 Па 30/70

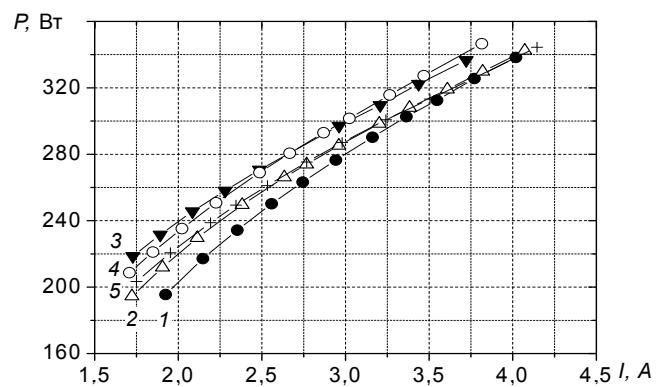


Рис. 2. Зависимости мощности разряда P от тока I при разных газовых наполнениях:

1 – 110 Па 30/70; 2 – 85 Па 40/60; 3 – 85 Па 60/40; 4 – 70 Па 40/60; 5 – 70 Па 30/70

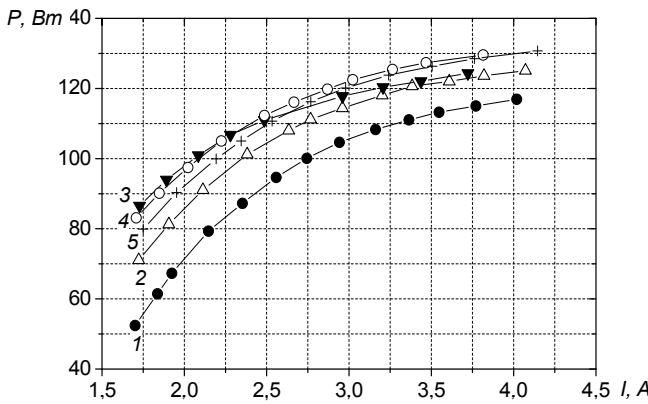


Рис. 3. Зависимости мощности УФ излучения P от разрядного тока I для разных наполнений:

1 – 110 Па 30/70; 2 – 85 Па 40/60; 3 – 85 Па 60/40; 4 – 70 Па 40/60; 5 – 70 Па 30/70

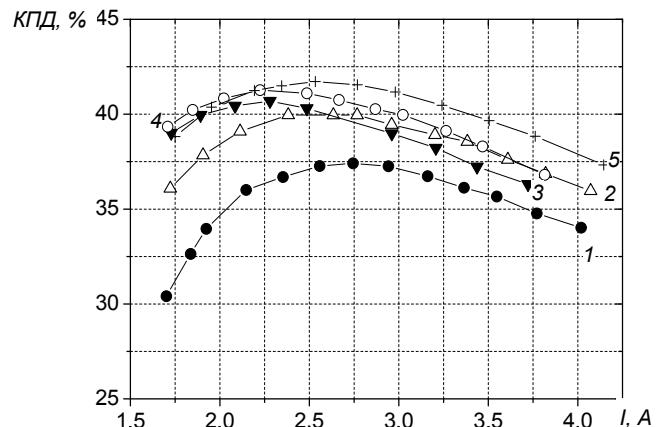


Рис. 4. Зависимости КПД лампы от разрядного тока I при разных наполнениях:

1 – 110 Па 30/70; 2 – 85 Па 40/60; 3 – 85 Па 60/40; 4 – 70 Па 40/60; 5 – 70 Па 30/70

рядного тока. Следовательно, разрядный ток можно использовать как инструмент для регулирования мощности газоразрядной лампы с рассматриваемыми наполнениями. Зависимости мощности УФ излучения от разрядного тока приведены на рис. 3–4. При получении данных криевых для каждого значения разрядного тока оптимизировались температурные режимы работы лампы для достижения оптимального давления паров ртути в разряде и получения максимальной мощности УФ излучения. Если давление ртути постоянно, а ток при данном диаметре трубы увеличивается, то выход УФ излучения увеличивается до насыщения, после чего остается постоянным. Потери на упругие соударения и на возбуждение «бесполезного» (не УФ) излучения на

других линиях продолжают расти, так что КПД уменьшается с увеличением тока.

Погонная мощность УФ излучения ламп (254 нм) с составом газовой смеси 30/70 при давлении 70 Па составляет 83 Вт/м. Изменение состава газовой смеси с 30/70 на 40/60 при том же давлении практически не изменяет мощность УФ излучения (см. рис. 3). При работе ламп с давлением 85 Па на смесях 40/60 и 60/40 мощность УФ излучения составила около 80 Вт/м, причём замена газовой смеси не вносит больших изменений. При повышении давления до 110 Па мощность УФ излучения падает до 73 Вт/м. КПД генерации излучения на длине волны 254 нм увеличивается при переходе к более низким давлениям газовой смеси. Известно, что использование в лампе пониженного давления и более

лёгких составляющих газовой смеси может отрицательно сказаться на сроке службы лампы. Предполагается, что при дальнейшем снижении давления и увеличении содержания неона в смеси можно получить более высокие значения КПД. Тем не менее рост КПД с понижением давления ограничен. В какой-то момент наступит ситуация, когда скорость диффузии носителей заряда на стенке станет настолько велика, что большая часть энергии, поступившей в разряд, будет расходоваться на поддержание необходимой концентрации заряженных частиц. Для экспериментов наиболее оптимальные разрядные токи ламп с внутренним диаметром 25 мм составляют от 2,4 до 3,0 А (см. рис. 1–4). При этом возможно дальнейшее повышение тока лампы для увеличения мощности УФ излучения при снижении КПД на 3–4 %. Эффект насыщения мощности УФ излучения возможен при токах свыше 4,0 А. Эксперименты показывают, что электрическая мощность, рассеиваемая на лампе, существенно меньше зависит от наполнения, чем КПД лампы. Так, при разрядном токе 3,0 А максимальный разброс по мощностям, рассеиваемым на лампе, в зависимости от наполнения, составляет около 5 % от измеряемой величины. При этом аналогичный разброс по КПД лампы составляет около 10 % от измеряемой величины. Таким образом, изменение наполнения гораздо меньше влияет на мощность разряда, чем на КПД преобразования электрической энергии в УФ излучение.

По экспериментальным данным зависимости параметров ламп различной конструкции от разрядного тока можно подбирать рабочие режимы по мощности при различных внешних условиях и требованиям. Мощность лампы регулируется не только изменением разрядного тока, но и модификацией состава и давления газовой смеси. Однако нельзя не учитывать тот факт, что КПД лампы может зависеть от газового наполнения в гораздо меньшей степени, чем от состава амальгамы, которая должна быть правильно подобрана под определённые температурные режимы работы лампы, чтобы обеспечить оптимальное давление паров ртути в рабочем температурном диапазоне. При неправильном выборе состава амальгамы реальный КПД источника УФ излучения может существенно снизиться.

Приведённые экспериментальные данные использованы для разработки мощных, высокоэффективных источников УФ излучения, которые применяются на станциях УФ обеззараживания питьевой и сточной воды производительностью более 100 000 м³ в сутки.

Библиографические ссылки

1. О методе определения давления пара ртути амальгам сложных систем для люминесцентных ламп / В.Ф. Дадонов, Л.Ф. Козин, Ю.А. Мещеряков, Р.Ш. Нигметова, А.С. Федоренко // Светотехника. 1978. № 12. С. 6.

2. Kreher J., Stern W. Increased Power Concentration and its Effect on the Discharge Parameters of the Low Pressure Hg-rare Gas Positive Column. 1. Variation of Current // Plasma Phys. 1988. Vol. 28. № 2. P. 185–200.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ

Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов

2013 г.

Объем 256 с.

Формат 60x88 1/16

ISBN 978-5-94275-607-9

Цена 800 р.



Приведены нормативные материалы, необходимые технологу-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 519.23: 658.562.3

В.В. Мартынов, д-р техн. наук, проф., **П.В. Мартынов**

(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина)

v_martynov@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

Представлен метод статистического прогнозирования износа режущего инструмента с использованием распределений экстремальных значений.

Ключевые слова: режущий инструмент, износ, прогнозирование, экстремальный критерий.

A statistical prediction method of the cutting tool wear through the use of the extreme value distributions is introduced.

Key words: cutting tool, wear, prediction, extreme test.

Износ режущего инструмента непосредственно влияет на параметры точности изготавливаемых при механической обработке деталей. Однако информационно-измерительные каналы оперативного контроля и диагностирования состояния инструмента в системах управления станков в большинстве случаев отсутствуют. В связи с этим разработка методов прогнозирования износа по результатам обработки и анализа статистических данных, полученных по результатам прямых измерений, является неотъемлемой составной частью работ по повышению надёжности и эффективности использования станочного оборудования.

Известно, что изнашивание инструмента является случайным процессом. Поэтому для полного учёта лежащих в его основе физических закономерностей для решения задач прогнозирования регистрируют не единичную его реализацию, а несколько реализаций или «ансамбль реализаций». В этом случае задачей обработки полученных данных является отображение закономерностей в виде некоторой функции $M(x)$, восстанавливаемой по L её сечениям. При этом поскольку сечения функции $M_k = M(x_k)$ являются случайными процессами, то и функция $M(x)$ также будет случайной. Из этого следует, что любая её количественная характеристика представляет собой некоторый вероятностный параметр $\Theta(x)$, оценка которого $\Theta^*(x)$ находится по ансамблю из N реализаций функции $m_1(x), \dots, m_i(x), \dots, m_N(x)$. Результатом обработки ансамбля является зависимость [1]:

$$\Theta^*(x) = \varphi_{\Theta}[m_1(x), \dots, m_i(x), \dots, m_N(x)].$$

Если провести новую серию из N реализаций, то можно получить другой ансамбль $m'_1(x), \dots, m'_i(x), \dots, m'N(x)$ и, соответственно, другую зависимость для $\Theta^*(x)$. Таким образом, и задача

оценивания вероятностных характеристик $\Theta^*(x)$, и задача идентификации самой функции $M(x)$ сводится к оценке вероятностных характеристик $\Theta^*_1, \dots, \Theta^*_k, \dots, \Theta^*_L$ системы случайных величин $(M_1, \dots, M_k, \dots, M_L)$, являющихся сечениями случайной функции $M(x)$.

Для определения значения N сначала необходимо решить задачу обоснования показателя $\Theta^*(x)$, который можно использовать для количественной идентификации функции изнашивания $M(x)$. Для этого вспомним, что одной из наиболее важных характеристик системы случайных величин служит точка, вокруг которой они группируются. Такой точкой обычно является математическое ожидание, определение которого по дискретизированным данным чаще всего сводится к вычислению оценки их среднеарифметического значения. В нашем случае это $m^*(x_k)$:

$$m^*(x_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(x_k). \quad (1)$$

Однако значения $m_i(x_k)$, по которым проводятся вычисления, в общем случае могут быть коррелированными. Поэтому среднеарифметическое значение можно принять в качестве оценки математического ожидания когда $N > 10$, так как в этом случае она будет обладать свойством несмещённости. Для того же, чтобы оценка (1) обладала свойством эффективности (т. е. имела минимальную дисперсию) необходимо принять число N , равным отношению дисперсии массива измерений $D_m(x_k)$ к дисперсии оценки (1):

$$D_{m^*}^*(x_k) = \frac{1}{N^2} \left[ND_m(x_k) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)R_{mm}(x_k) \right],$$

где $R_{mm}(x_k)$ – автокорреляционная функция массива замеров $m_i(x_k)$.

Таким образом, окончательно имеем следующее неравенство для определения количества реализаций процедуры измерений функции $M(x)$:

$$10 \leq N \leq \frac{D_m(x_k)}{D^*_{m^*}(x_k)}.$$

При этом чем ближе значение N будет к значению, равному отношению дисперсий, тем ближе оценки $m^*(x_k)$ к истинным значениям функции $M(x_k)$.

Математическое ожидание – это центр тяжести распределения случайных величин, так как является той точкой, относительно которой сумма произведений расстояний, отложенных влево, на соответствующую вероятность, в частности уравновешивается соответствующей суммой взвешенных значений, расположенных справа. Это означает, что для любого сечения k можно сформировать область R_M , в которой измеренные значения случайной величины M_k всегда будут находиться с заданной вероятностью P . Сформировать область для нормального распределения результатов измерений в сечении несложно, так как достаточно определить их удвоенное (для 95 % вероятности) или утроенное (для вероятности 99,73 %) стандартное отклонение $S_m(x_k)$ от среднего значения. Тогда размеры области R_M запишутся в виде

$$m^*(x_k) - 2(3) \times S_m(x_k) \leq R_M \leq m^*(x_k) + 2(3) \times S_m(x_k).$$

Если же результаты измерений имеют корреляцию, т. е. закон их распределения отличен от нормального, то для определения размеров об-

ласти целесообразнее воспользоваться неравенством Чебышева [1]:

$$P(|m(x_k) - m^*(x_k)| \geq \varepsilon) \leq S^2 m(x_k) / \varepsilon^2, \quad (2)$$

означающим, что для любого положительного числа $\varepsilon > 0$ вероятность того, что отклонение случайного измерения $m(x_k)$ от его математического ожидания $m(x_k)$ будет не меньше этого числа, не превзойдет $S^2 m(x_k) / \varepsilon^2$. Тогда, если необходимо обеспечить 95 %-ю вероятность нахождения результатов измерений в области R_M , то следует принять $\varepsilon \approx 4,5 S_m(x_k)$, а если необходимо обеспечить вероятность 99,73 %, то следует принять $\varepsilon \approx 19,25 S_m(x_k)$.

Формирование области существования функции $M(x)$ является важным моментом обработки выборочных данных, так как именно её размеры совместно с законом распределения данных лежат в основе создания модели прогнозирования эволюции случайного процесса для определения промежуточных и/или конечных результатов.

Прогнозировать процесс изнашивания целесообразно с учётом того, что под действием внешних и внутренних факторов, которые являются случайными величинами, размеры и форма области существования функции $M(x)$ будут изменяться. В связи с этим модель прогнозирования целесообразно строить таким образом, чтобы, отображая с её помощью эти изменения, можно было получить исходные данные для построения закона распределения результатов процесса изнашивания, который будет их полной характеристикой. Графическая интерпретация такой модели представлена на рис. 1 [2]. Реализации прогнозируемого параметра износа $x(t)$ представляют собой вероятностное пространство, которое формирует область R_M существования функции $M(x)$ распределениями $f_j(x)$ в каждый момент времени. Результат процесса изнашивания рассматривается как достижение параметром некоторого предельно допустимого значения x_{\max} . Совокупность моментов времени T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) достижения каждой из реализаций процесса изнашивания x_i предельно допустимого значения x_{\max} определяет гистограмму, а следовательно, и закон распределения времени T_i в дифференциальной $f(t)$ и интегральной $F(t)$ или $P(t)$ формах.

Простой анализ представленной модели показывает, что первой предельно допустимого значения достигает реализация, в которой прогнозируемый параметр в любой момент времени (например, T_1 на рис. 1) имеет экстремальное (максимальное) значение x_{\max} . В связи с этим каждое значение T_i также является экстремальным (соот-

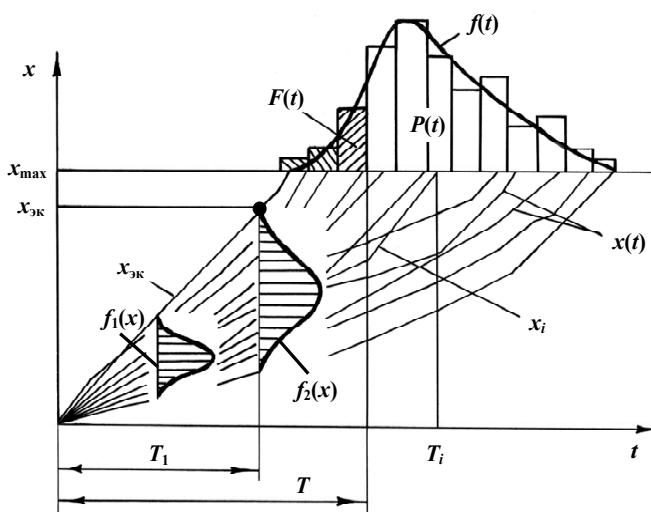


Рис. 1. Графическая интерпретация модели прогнозирования

ветственно наименьшим). Из этого следует, что их распределение будет представлять собой распределение экстремальных (минимальных) значений.

В общем случае любое распределение экстремальных значений зависит от объёма выборки n . Однако, если n велико, то можно использовать некоторые общие асимптотические результаты, которые зависят от допущений относительно характера распределения значений функции $M(x)$. Существует большое количество асимптотических распределений. Однако с учётом того, что в данном случае распределение значений функции $M(x)$ может быть как нормальным, так и отличаться от него, то целесообразно воспользоваться [3]:

асимптотическим распределением типа I для минимального числа n независимых случайных величин, распределение которых имеет вид экспоненты и ограничено справа;

асимптотическим распределением типа III или распределением Вейбулла для минимального числа n независимых случайных величин, распределение которых ограничено слева.

Интенсивность обоих распределений представляет собой экспоненциально возрастающую функцию.

Выражение плотности асимптотического распределения типа I имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[\frac{1}{\sigma} (x - \mu) - e^{(1/\sigma)(x-\mu)} \right], \quad (3)$$

$-\infty < x < \infty, \quad -\infty < \mu < \infty, \quad \sigma > 0.$

Распределение имеет левостороннюю положительную асимметрию, его параметры μ и σ являются параметрами, характеризующими, соответственно, центр распределения и масштаб. Распределение имеет только одну форму. Оценки параметров по экспериментальным данным можно найти с использованием среднего значения \bar{x} и стандартного отклонения s с помощью следующих соотношений [4]:

$$\hat{\sigma} = s / 1,283,$$

$$\hat{\mu} = \bar{x} + 0,577 \hat{\sigma}.$$

Плотность распределения Вейбулла имеет вид

$$f(x; \eta, \sigma) = \begin{cases} \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^{\eta-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\sigma} \right)^\eta \right], \\ 0 \text{ в остальных случаях}, \end{cases}$$

$x \geq 0; \quad \eta > 0; \quad \sigma > 0, \quad (4)$

где σ, η – параметры масштаба и формы, соответственно, определение оценок которых по эксперимен-

тальным данным обычно предполагает решение нелинейных уравнений максимального правдоподобия методом последовательных приближений, зависящих от выбора начального значения.

Прогнозирование износа инструмента с помощью предложенного метода требует аналитического описания реализаций функции $M(x)$. С учётом того, что обычно данные о процессе изнашивания, получаемые по результатам измерений износа, носят дискретный характер, целесообразным является их описание смешанной дискретной моделью авторегрессии со скользящим средним (APCC-моделью), которая в общем виде представляется уравнением [4]

$$\begin{aligned} x_t - \Phi_1 x_{t-1} - \Phi_2 x_{t-2} - \dots - \Phi_n x_{t-n} = \\ = a_t - Q_1 a_{t-1} - Q_2 a_{t-2} - \dots - Q_{n-1} a_{t-n+1}, \\ E(a_t) = 0, \quad E(a_t^2) = 0, \quad E(a_t \times a_{t-k}) = \delta_K \sigma_a^2, \end{aligned}$$

где Φ_1, \dots, Φ_n – авторегрессионные параметры; Q_1, \dots, Q_{n-1} – параметры скользящего среднего; a_t – независимые нормально распределённые случайные величины, имеющие нулевое математическое ожидание и дисперсию σ_a^2 (т. е. $a_t \in N(0, \sigma_a^2)$), представляющие собой возмущения, под действием которых развивается процесс изнашивания; δ_K – символ Кронекера; n – порядок модели; E – символ математического ожидания.

Основной особенностью данной модели является возможность вычисления с её помощью возмущений a_t и отображения изнашивания как процесса, имеющего тренд, выражением вида:

$$x_t = a_t + a_{t-1} + a_{t-2} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} a_{t-j}.$$

Данное выражение означает, что процесс в каждый момент времени образуется прибавлением к предыдущему положению случайного шага, который для периодических процессов является случайным по величине и направлению, а для монотонных – только по величине:

$$x_t = x_{t-1} + a_t. \quad (5)$$

Это позволяет оценить возможность достижения износом значения x_{\max} , выполнить идентификацию распределения времени его достижения и обосновать критерии достоверности прогноза, которые будут не только обеспечивать наиболее вероятное значение достоверности, но и позволяют решать задачи прогнозирования, не прибегая к вычислению параметров, характеризующих текущие размеры области существования функции $M(x)$.

Переходя к обоснованию критериев, заметим, что они будут связаны с величинами предельно допустимого значения процесса изнашивания и дисперсии σ_a^2 АРСС-модели. Иначе говоря, вероятность и(или) время достижения износом предельного значения зависят от их соотношения, которое определяет два возможных исхода:

износ достигнет предельно допустимого значения с определённой вероятностью;

износ гарантированно достигнет предельно допустимого значения за конечное число шагов.

Первый исход позволит определить вероятность достижения износом предельно допустимого значения, несмешённая оценка которой p_{Δ} представляет собой отношение количества реализаций K , в которых износ достиг предельно допустимого значения, к их общему числу N , т. е.

$$p_{\Delta} = K/N, \quad (6)$$

а её дисперсия

$$D(p_{\Delta}) = p_{\Delta}(1 - p_{\Delta})/N.$$

Второй исход позволит установить интервал времени $T_{\alpha/2} - T_{1-\alpha/2}$ достижения износом предельного значения с вероятностью $1-\alpha$, где $\alpha/2$ и $1-\alpha/2$ – квантили распределений (3) или (4), определяемые либо с помощью специальных

таблиц, либо по результатам решения уравнения

$$F(t) = \alpha,$$

где $F(t)$ – интегральная функция распределения; α – уровень значимости (в частности, для вероятности 0,95 это будут квантили 0,025 и 0,975).

Найденные критерии и будут характеризовать достоверность прогноза, поскольку другой вероятности или другого временного интервала в рамках предложенного подхода просто не существует.

Дисперсии σ_a^2 были определены аналитико-статистическим методом [5] с использованием модели (5) для различных предельно допустимых значений износа. Величина σ_a^2 последовательно изменялась от нуля, и моделировалось n траекторий движения износа к предельному значению x_{\max} . Затем по выражению (6) вычислялась вероятность достижения предельного значения. Дисперсия изменялась до тех пор, пока вероятность не становилась равной единице, т. е. пока предельного значения не достигали все траектории. Таким образом, по результатам моделирования формировались диапазоны изменения дисперсии σ_a^2 , соответствующие обоим исходам достижения износом предельного значения и формирующие область существования функции $M(x)$.

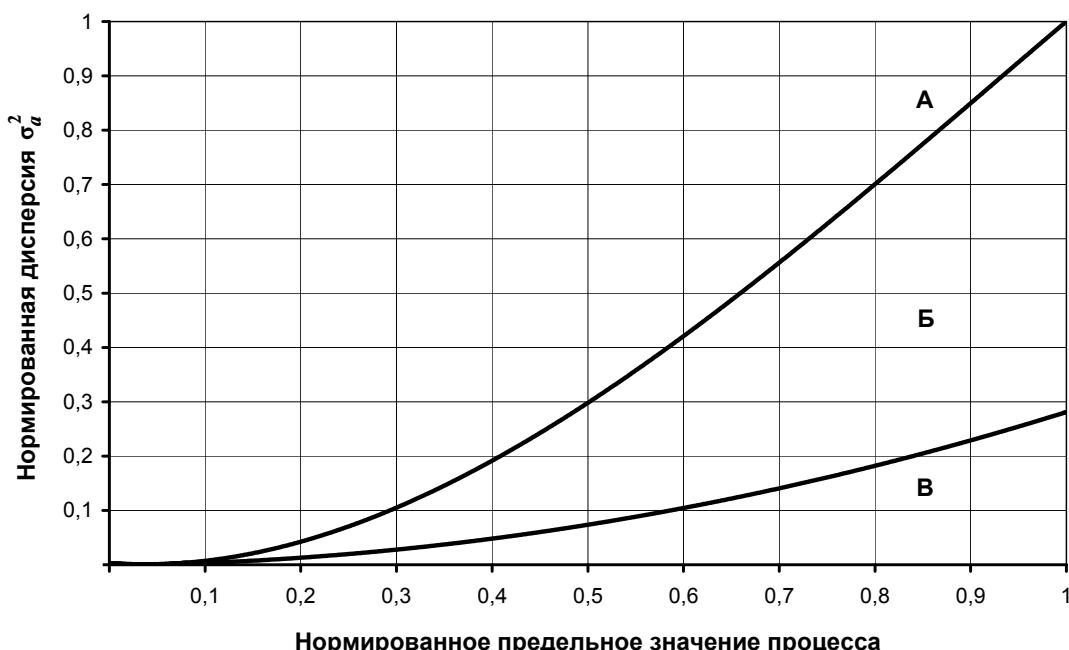


Рис. 2. Результаты определения оценок дисперсий σ_a^2 :

А, Б – области гарантированного и возможного достижения предельного значения, соответственно; В – область гарантированного недостижения предельного значения

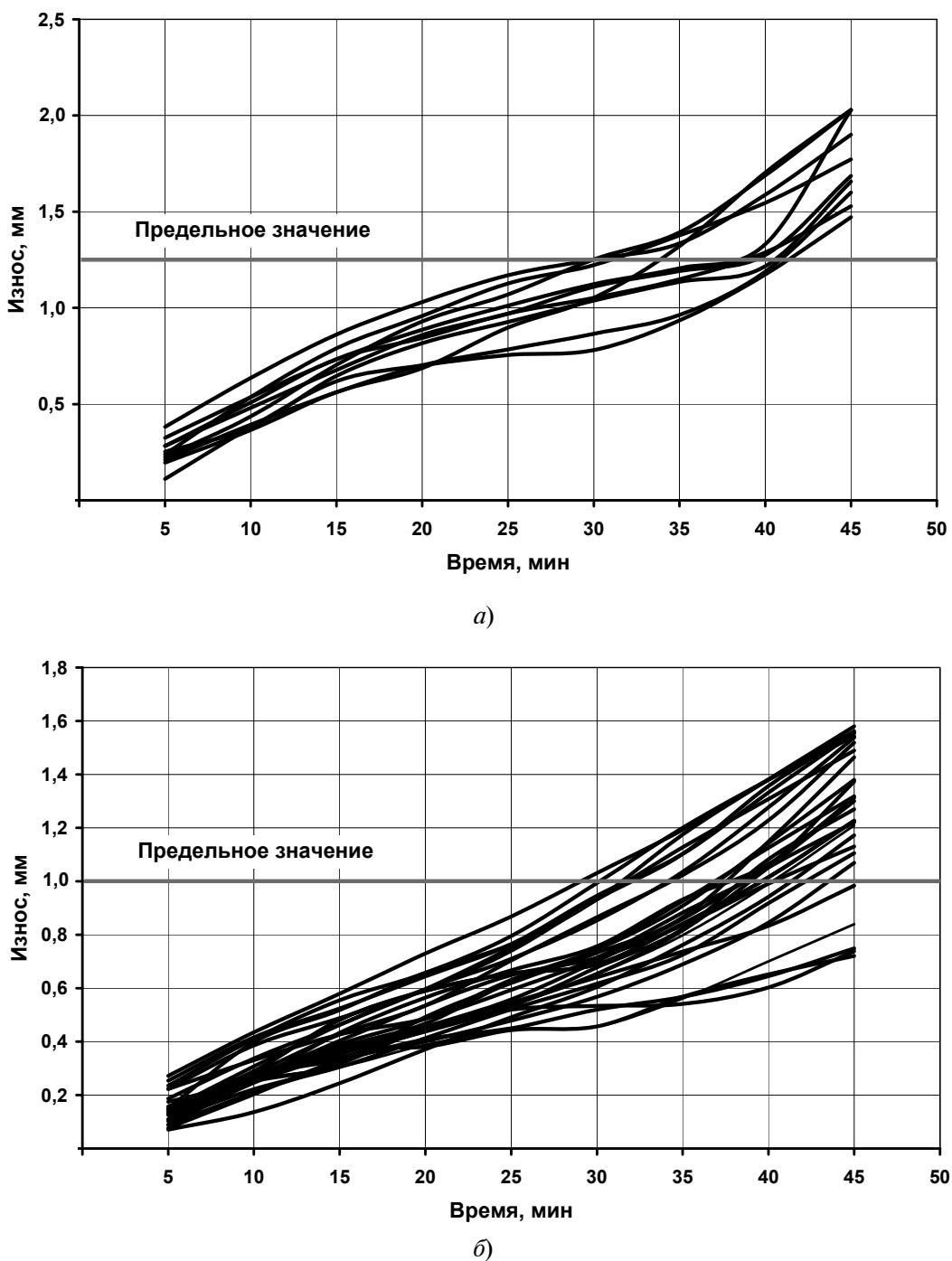


Рис. 3. Реализации кривых износа инструмента из быстрорежущей стали (а) и твёрдого сплава (б)

Результаты определения дисперсии σ_a^2 , сглаженные полиномами второго порядка, представлены в относительных единицах на рис. 2 и могут использоваться в качестве исходных данных при разработке алгоритмического обеспечения метода (названного с учётом используемых в нём распределений методом экстремального критерия), в соответствии с которым будут выполняться процедуры прогнозирования износа и статистической оценки его достоверности.

Практическую реализацию метода рассмотрим на примере данных об износе по задней поверхности инструментов из быстрорежущей стали и твёрдого сплава Т15К6, зафиксированных при черновой обработке стальных заготовок (рис. 3) [6].

На первом этапе выполнена обработка данных для идентификации распределения и реального 95 %-го интервала времени достижения износом предельного значения.

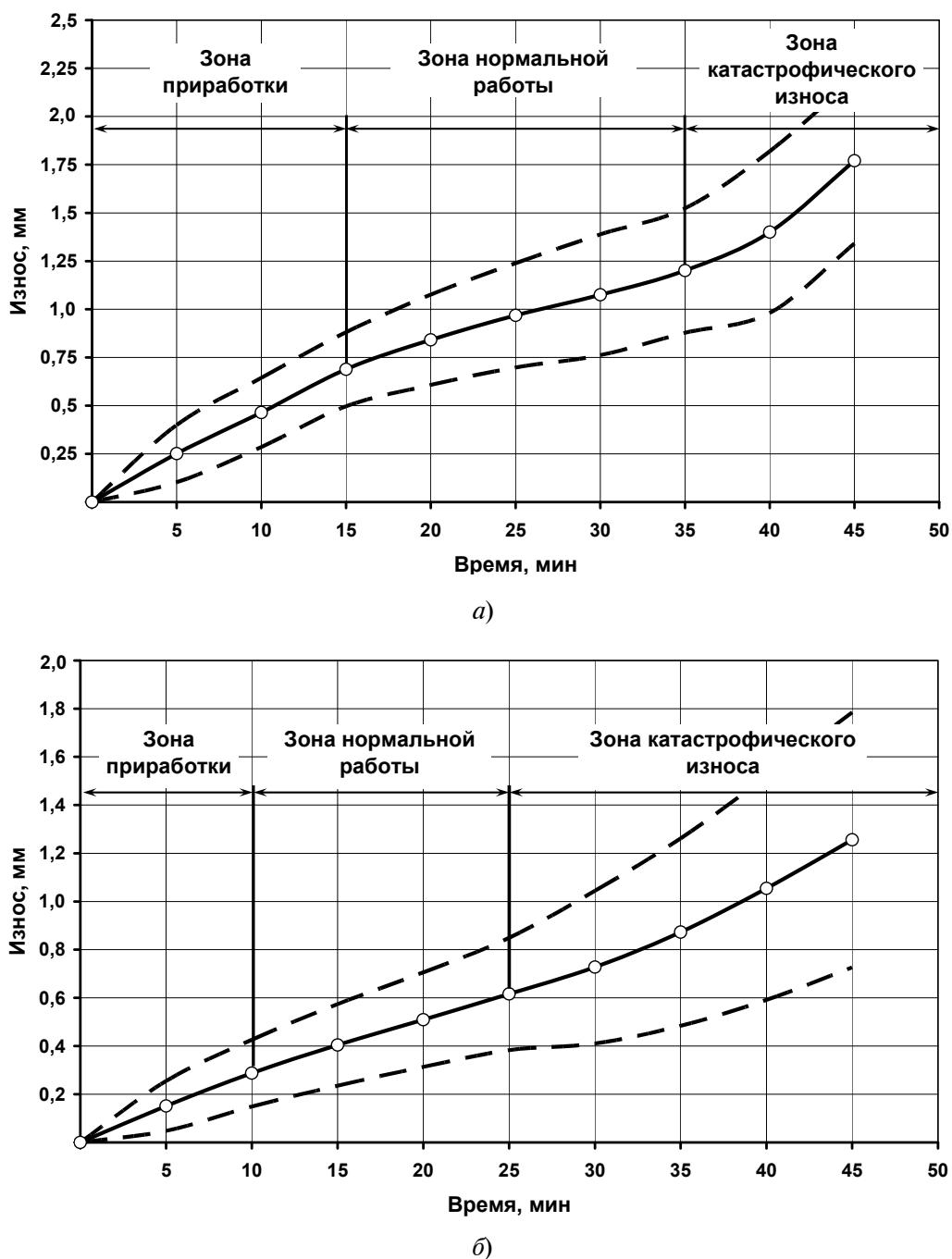


Рис. 4. Результаты обработки данных по износу инструмента из быстрорежущей стали (а) и твёрдого сплава (б)

Проверка данных на наличие в них тренда с помощью критерия инверсий [7] показала, что тренд в данных имеется, поэтому их нельзя считать случайными. Это означает, что, во-первых, области существования функции износа необходимо определять неравенством Чебышева (2). Во-вторых, в качестве распределения времени достижения износом предельного значения целесообразно использовать распределение Вейбулла (4), так как оно являются асимптотическим не только для нормально распределённых

случайных величин, но и случайных величин, имеющих другие ограниченные слева распределения [3].

Результаты определения областей существования функций износа представлены $4S_m(x_k)$ -ми зонами (т. е. с вероятностью 75 %) на рис. 4 и являются типичными, так как полученные графики функций износа отображают не только основные режимы работы инструментов (приработку, нормальную работу и катастрофический износ), но и рост степени неопределенности со-

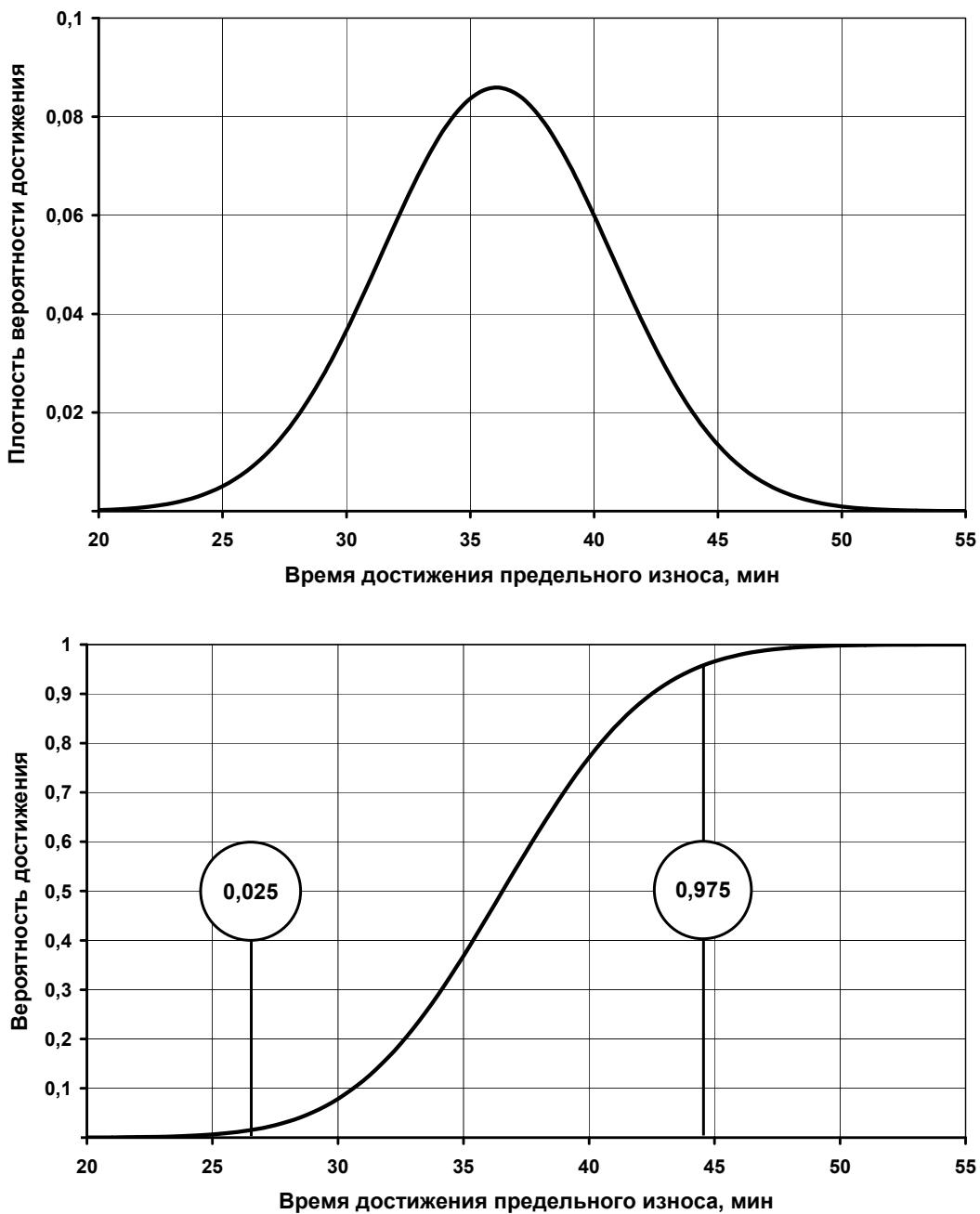


Рис. 5. Результаты идентификации распределения и 95 % интервала времени достижения предельного износа инструментом из быстрорежущей стали

стояния инструмента, выраженный увеличением размеров областей определения функций по мере приближения величины износа к предельному значению.

Результаты идентификации распределения времени достижения износом предельного значения в 1,25 мм для инструмента из быстрорежущей стали и 1 мм для твёрдосплавного инструмента представлены на рис. 5 и 6 и показывают, что интервал $T_{0,025} - T_{0,975}$ полностью охватывает исходные данные (см. рис. 3) и составляет:

для инструмента из быстрорежущей стали 25,4 – 43,4 мин;

для инструмента из твёрдого сплава 28,0 – 43,3 мин.

На втором этапе выполнена собственно процедура прогнозирования износа инструментов. При этом сначала была проведена проверка достоверности результатов определения абсолютных значений дисперсий σ_a^2 по диаграмме на рис. 2. Для этого выполнялось моделирование исходных данных с помощью АРСС-

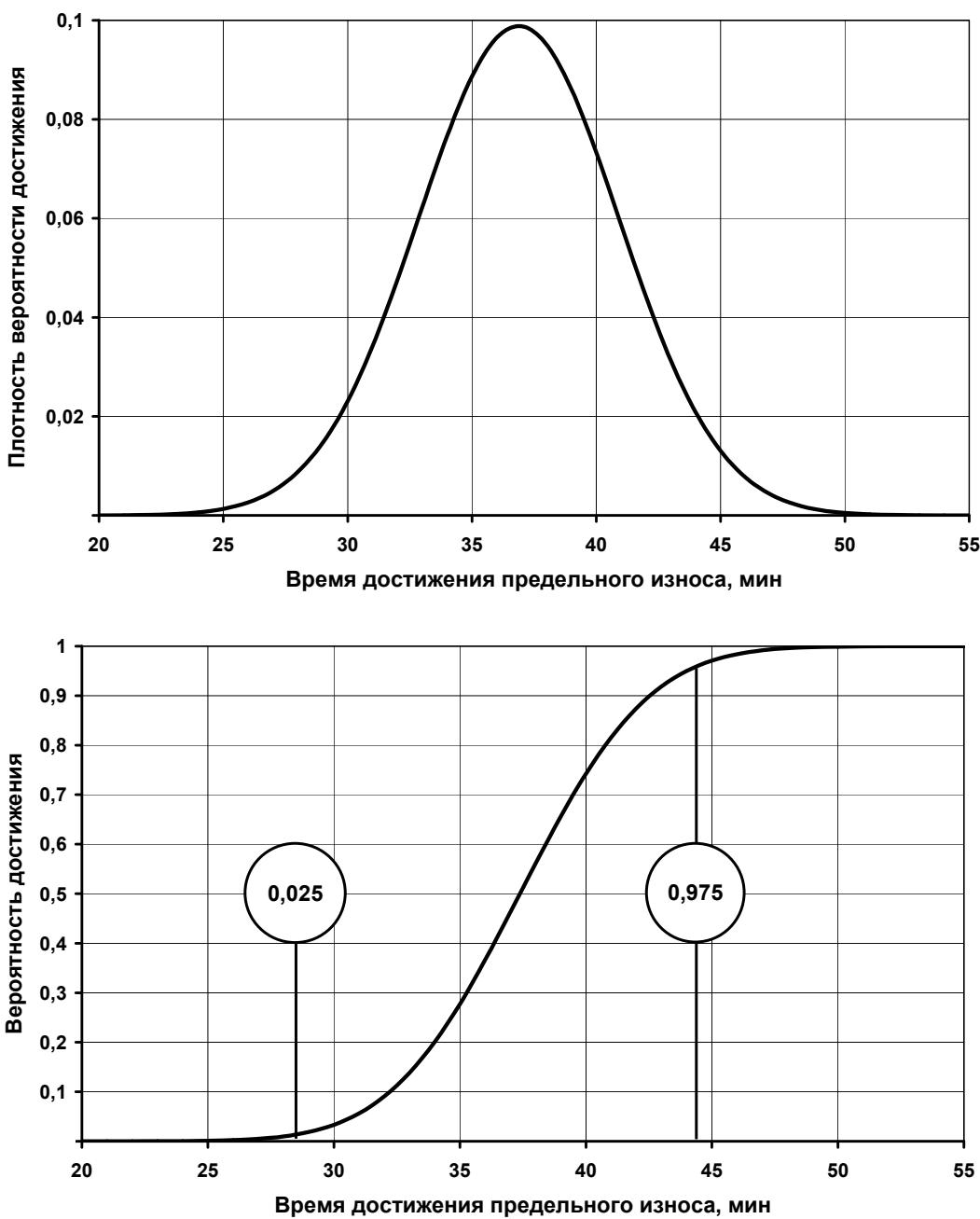


Рис. 6. Результаты идентификации распределения и 95 % интервала времени достижения предельного износа инструментом из твёрдого сплава

модели (5), что позволило установить следующее:

модели траекторий на рис. 3 имеют первый порядок, т. е. являются чисто авторегрессионными моделями;

параметр Φ_1 моделей во всех случаях имеет значения, доверительные интервалы которых включают единицу. Это означает существование единого физического механизма, лежащего в основе получения данных и связанного с преобладанием одного вида износа (абразивного);

значения дисперсии σ_a^2 , характеризующей в данном случае интенсивность протекания тепловых (или силовых) процессов, лежат в диапазоне 0,0023–0,0133 усл. ед.² (при среднем значении 0,0068 усл. ед.²) для инструмента из быстрорежущей стали и в диапазоне 0,0003–0,0038 усл. ед.² (при среднем значении 0,0019 усл. ед.²) для инструмента из твёрдого сплава;

значения функции износа в сечениях имеют нормальное распределение, в связи с чем для статистической оценки достоверности результатов

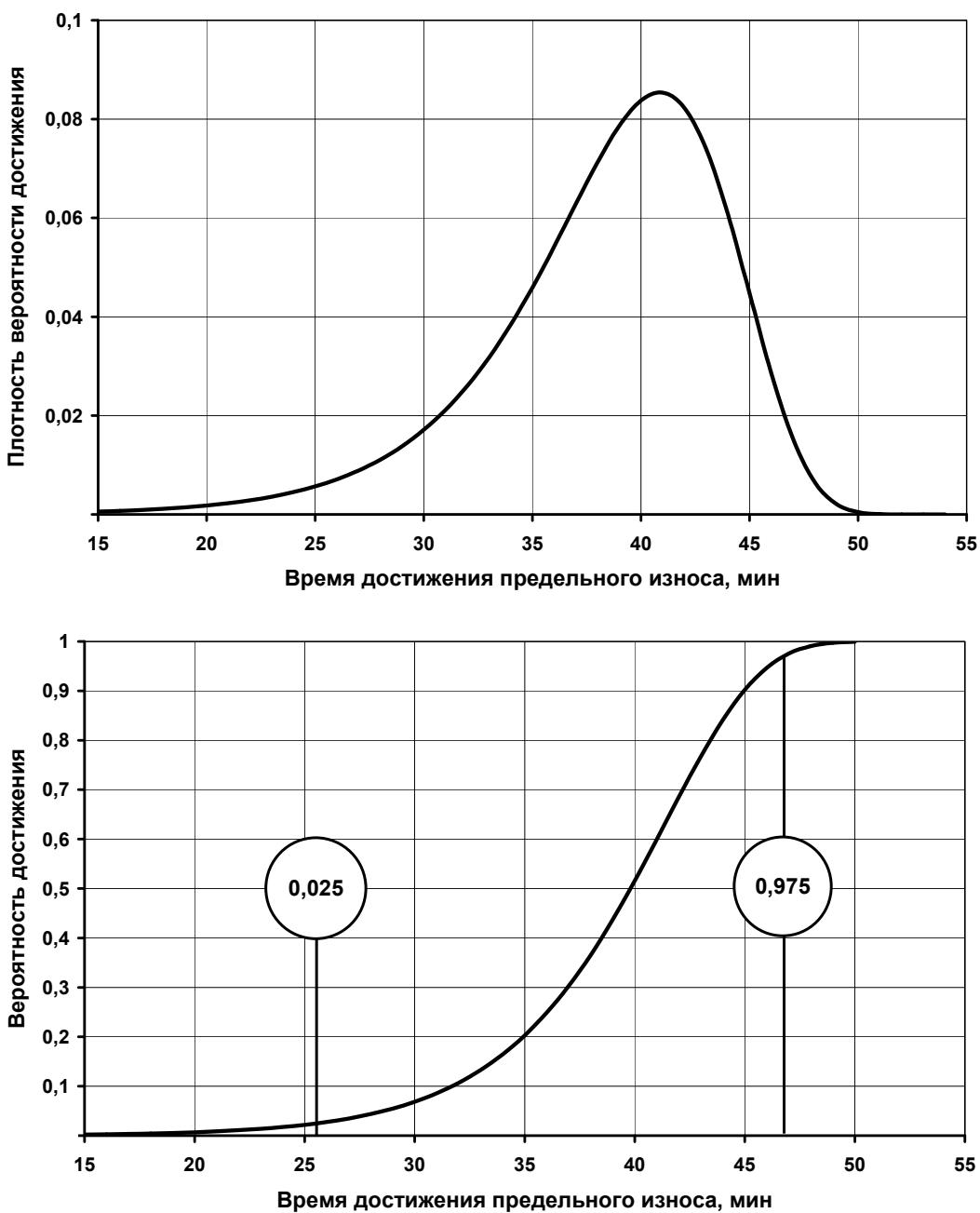


Рис. 7. Результаты прогнозирования распределения и 95 % интервала времени достижения предельного износа инструментом из быстрорежущей стали

прогнозирования можно использовать асимптотическое распределение типа I.

Результаты прогнозирования представлены на рис. 7, 8 и показывают, что интервалы времени $T_{0,025} - T_{0,975}$, составив для инструмента из быстрорежущей стали 25,6 – 46,8 мин и из твёрдого сплава 23,2 – 45,2 мин, достаточно точно совпадают с интервалами, полученными на этапе идентификации по экспериментальным данным. Относительные погрешности прогнозирования границ интервалов имеют следующие величины:

для нижней 0,79 % (быстрорежущая сталь) и 17,1 % (твёрдый сплав),

для верхней 7,83 % (быстрорежущая сталь) и 4,39 % (твёрдый сплав).

Природа возникновения этих погрешностей связана с тем, что шаг, с которым модель (5) формировалась траектории износа, имел постоянное значение, так как определялся по усреднённым скоростям изнашивания инструментов, имевшим отклонения от скоростей в каждой из зон (рис. 9, 10). Компенсация этих отклонений

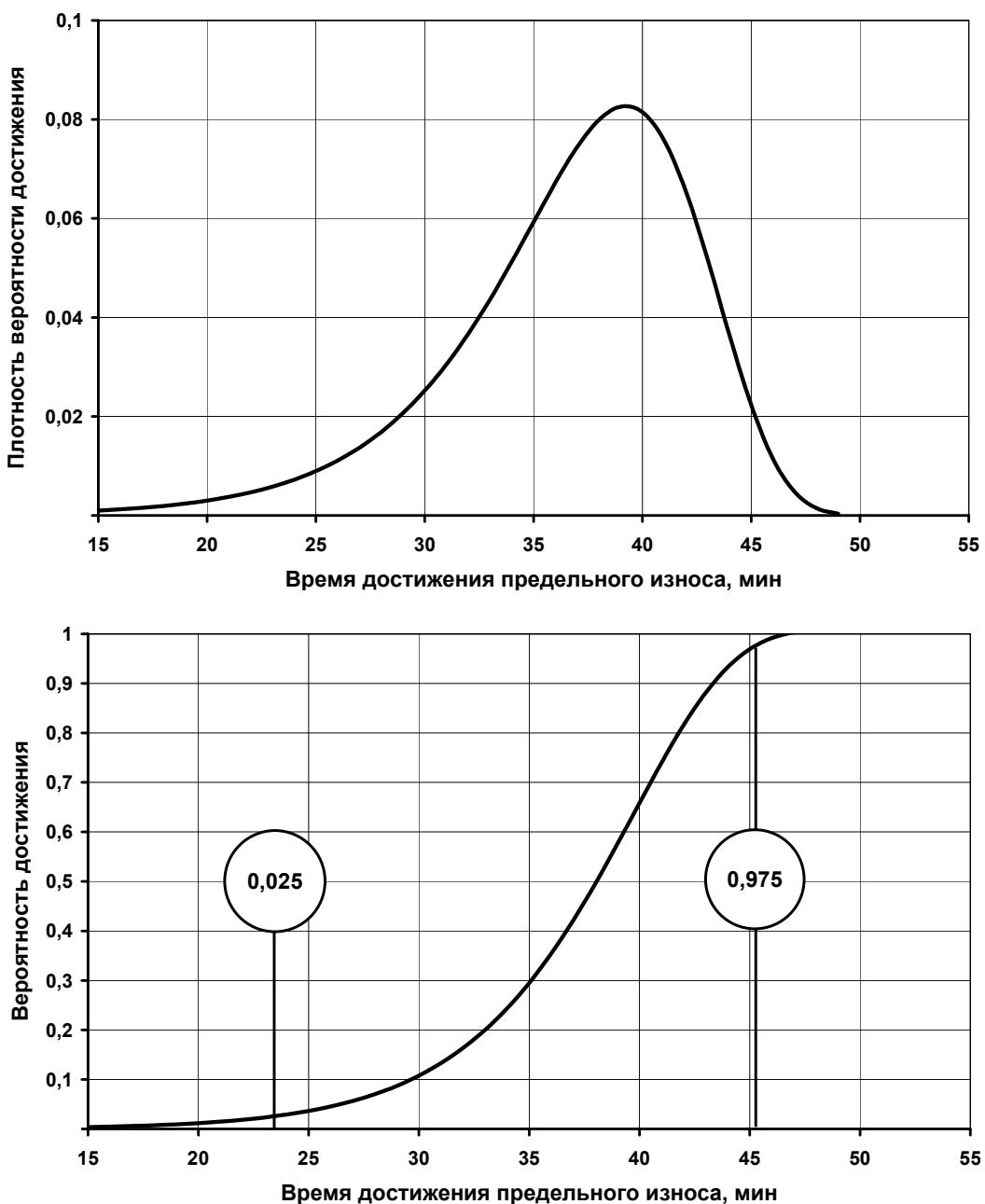


Рис. 8. Результаты прогнозирования распределения и 95 % интервала времени достижения предельного износа инструментом из твёрдого сплава

была частичной за счёт асимптотических свойств модели (5).

Степень компенсации в среднем зависела от того, насколько значимо средняя скорость отклонялась от скоростей в зонах. Прямое сопоставление средних величин отклонений скоростей с погрешностями прогнозирования среднего времени достижения предельного износа для инструмента из быстрорежущей стали 27,31 % и 6,48 %, а для инструмента из твёрдого сплава 13,94 % и 2,84 % подтверждает правомерность и достоверность данного вывода.

Изложенное выше означает, что имеется резерв повышения точности моделирования траекторий, в основе которого лежит учёт вариаций скорости изнашивания. С теоретической точки зрения в рамках подхода, заложенного в основу математического и алгоритмического обеспечения разработанного метода, это определяет необходимость решения задачи разработки стратегии определения шага моделирования траекторий в пределах каждой из зон износа и моментов перехода к новому шагу, которые являются случайными событиями. Иначе говоря, существует

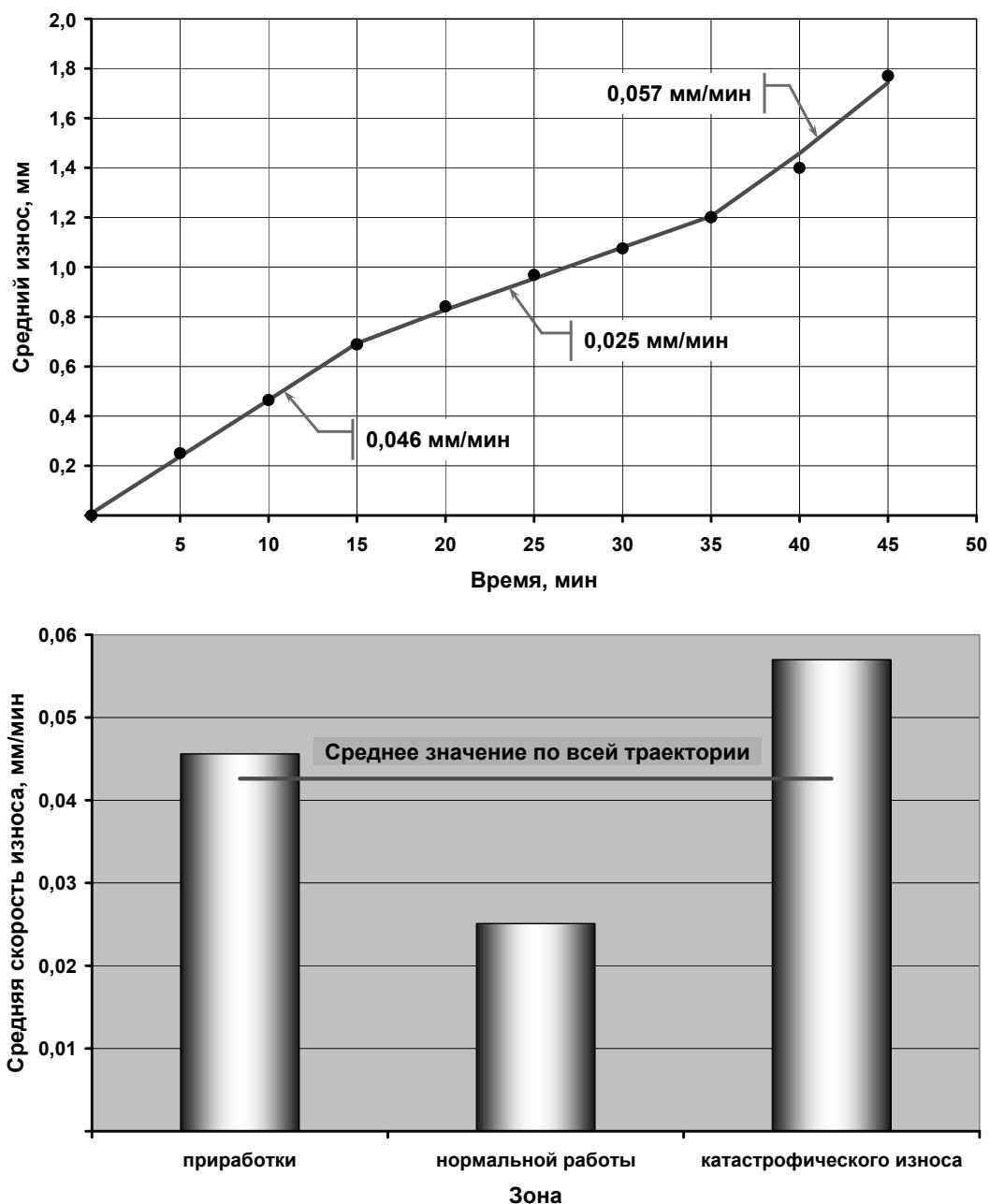


Рис. 9. Вариации средних скоростей износа инструмента из быстрорежущей стали

механизм повышения достоверности прогноза времени достижения износом предельного значения.

Второй момент повышения точности моделирования связан с определением наибольшего значения дисперсии σ_a^2 , от которого зависит наименьшее время достижения износом предельного значения и, как следствие, разброс значений функции $M(x)$, определяющий не только параметры, но и вид распределений (3) или (4). Это означает, что определение наибольшего значения дисперсии связано с оценкой соответствия

распределения получаемых значений функции $M(x)$ нормальному. Для этого в процессе моделирования для каждой новой траектории износа необходимо проверять гипотезу об отсутствии тенденции в сечениях функции $M(x)$ с помощью критерия инверсий, который имеет асимптотическую эффективность $(3/\pi)^{1/3} \approx 0.98$ и превосходит большинство других непараметрических критериев для проверки гипотезы о существовании тенденции [7].

Полученные материалы позволяют сделать вывод о том, что моделирование траекторий, по ко-

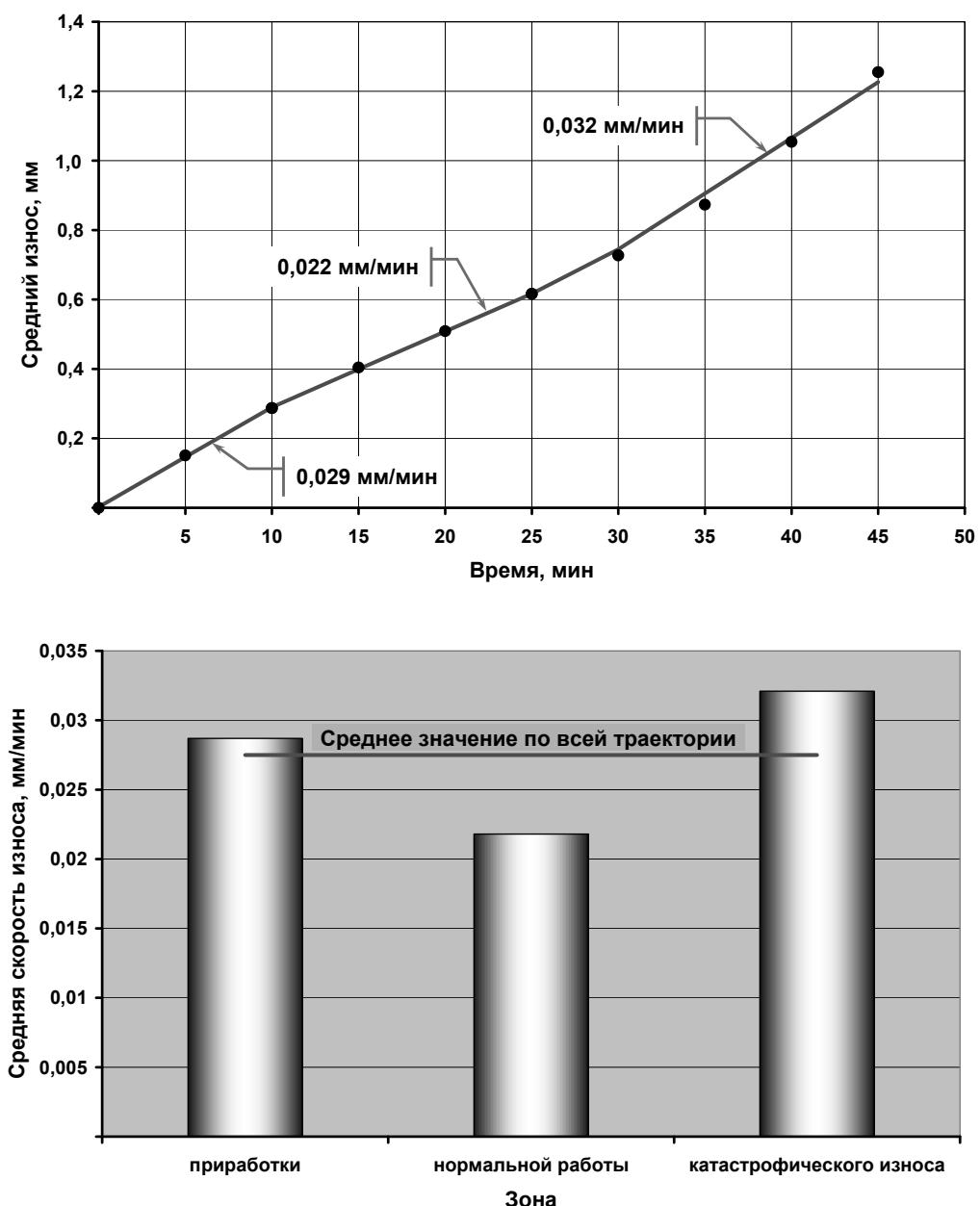


Рис. 10. Вариации средних скоростей износа инструмента из твёрдого сплава

торым развивается процесс изнашивания режущего инструмента, позволяет прогнозировать его износ методом статистического оценивания результатов моделирования с использованием критериев экстремального вида и на этой основе принимать обоснованные решения, направленные на обеспечение надёжности технологических процессов изготовления деталей на металорежущих станках.

Библиографические ссылки

1. Вероятностные методы в вычислительной технике / А.В. Крайников, Б.А. Курдиков, А.Н. Лебедев и др. [под ред. А.Н. Лебедева и Е.А. Чернянского]. М.: Высш. шк., 1986. 312 с.

2. Проников А.С. Надёжность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

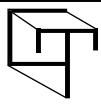
3. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1968. 396 с.

4. Pandit S.M., Wu S.M. Time series and system analysis with applications. New York: John Wiley and Sons, 1983. 586 p.

5. Коваленко И.Н. Аналитико-статистический метод расчёта характеристик высоконадёжных систем // Кибернетика. 1976. № 6. С. 82–92.

6. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов. М.: Машгиз, 1959. 496 с.

7. Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия—Телеком, 2007. 522 с.



УДК 681.513, 621.382

В.А. Васин, канд. техн. наук, **Е.Н. Ивашов**, д-р техн. наук, **М.Ю. Корпачёв**,
П.С. Костомаров, **С.В. Степанчиков**, канд. техн. наук
(Московский институт электроники и математики)

mkorpachev@gmail.com

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ УФ-ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрена многокритериальная задача принятия решения при проектировании ультрафиолетового литографического оборудования, которая решается путём применения обобщённого критерия оценки качества, включающего технические, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии с учётом их весовых коэффициентов. Показано, что предпочтительными критериями при сравнении вариантов конструктивных решений рассматриваемых технологий и оборудования являются надёжность и ожидаемый экономический эффект. Предложены методы оценки надёжности систем из многофункциональных модулей с произвольным видом компоновки оборудования, задействованного при выполнении технологических операций УФ-литографии.

Ключевые слова: многокритериальная задача, ультрафиолетовая литография, литографическое оборудование, модульное оборудование, обобщённый критерий оценки качества, надёжность.

Task of the multicriterion solution when designing of the ultra-violet lithography equipment is considered. This task is solved by the application of the quality valuation generalized criterion, including technical, technological, structural, economic and environmental local criteria by taking into account their weighting coefficients. It is shown that the preferable criteria for designing versions comparing of the considered technology and equipment are reliability and the expected economic effects. The reliability valuation methods of the systems from multifunctional modules with an arbitrary equipment layout involved in the UV-lithography technological operations discharge are proposed.

Key words: multicriterion task, UV-lithography, lithography equipment, modular equipment, generalized quality valuation criterion, reliability.

Проектирование УФ-литографического оборудования (УФЛО) связано с расчётом потенциального уровня надёжности вариантов его реализации. Построение современного УФЛО, для которого характерна многофункциональность модулей, определяет актуальность развития методов оценки надёжности, учитывающих взаимозависимость событий и потерю модулем способности выполнять свои функции.

Благодаря волновому характеру оптических процессов важнейшим преимуществом технологии формирования изображений с помощью ультрафиолетовой литографии (рис. 1 на 2-й полосе обложки) является возможность одновременного и параллельного переноса изображений, состоящих из многих миллионов элементарных фрагментов.

Рассмотрим стадии типичного процесса ультрафиолетовой литографии.

Очистка поверхности подложки и подготовка к формированию резистного рельефа. Этот процесс в англоязычной литературе получил название прайминг (priming). В современном литографическом процессе этот этап состоит из механической (в том числе и ультразвуковой) обработки, химических обработок, удаляющих органические загрязнения, плазмохимического травления тонких слоёв (если это допустимо для активных слоёв), обработкой в парах гексаметилдисилазана.

Нанесение слоя фоторезиста на поверхность подложки и его сушика. Обычно эту операцию осуществляют при помощи нанесения капли фоторезиста на быстро вращающуюся подложку, закреплённую на роторе центрифуги (рис. 2 на 2-й полосе обложки) [1]. Если литография проводится на подложках с развитой топологией, её предварительно планаризуют (выравнивают), например при помощи нанесения слоя легкоплавкого

покрытия или полимеризованного в плазме мономера [2]. Иногда используют нанесение фоторезиста из его аэрозоля. Сушка необходима для удаления остатков растворителя. Правильный выбор её режимов позволяет уменьшить дефектность слоя и улучшить воспроизводимость результатов микролитографии.

Избирательное экспонирование фоторезиста ультрафиолетовым излучением. Такую операцию можно осуществить облучением светочувствительного слоя через фотошаблон. В зависимости от способа проектирования рисунка в плоскость фоторезиста различают контактные и бесконтактные (проекционные) методы ультрафиолетовой литографии (рис. 3 на 2-й полосе обложки).

Пострадиационная термическая обработка облучённого резистного слоя. При такой обработке улучшаются функциональные характеристики резистных масок, прежде всего их контрастность при проявлении. Кроме того, правильно выбранный режим пострадиационной обработки позволяет «залечивать» дефекты фоторезистных масок за счёт релаксации механических напряжений, возникающих вследствие структурных перестроек фоторезистных слоёв во время их экспонирования.

Проявление изображения в слое резиста (например, избирательное удаление экспонированных участков – в случае позитивно работающих или позитивных резистов или избирательное удаление неэкспонированных участков – в случае негативно работающих или негативных резистов) является центральной стадией фотолитографии (рис. 4 на 3-й полосе обложки) [1]. Оно чаще всего определяет функциональные характеристики резистных масок, а также технологические параметры ультрафиолетовой микролитографии. При проявлении используется разница в устойчивости экспонированных и неэкспонированных участков слоя фоторезиста по отношению к действию проявляющего химического вещества (агента) или физического воздействия (например, нагревания).

Термическая обработка полученной резистной маски для улучшения её эксплуатационных характеристик. Такая обработка повышает прежде всего защитные свойства фоторезиста, а также его дефектность.

Модификация поверхностных слоев материала подложки (вытравливание объёмных структур, легирование материала подложки, нанесение на открытые участки подложки различных материалов и т. д.) через сформированные на её поверхности резистные маски [3].

Удаление резистной маски с поверхности подложки. Для этого используется травление маски в плазме ионизированного газа.

Современная ультрафиолетовая литография – невероятно сложный и дорогостоящий технологический процесс. На её долю приходится более половины производственных затрат при изготовлении изделий микроэлектроники [3]. Именно она чаще всего определяет возможность получения того или иного полупроводникового прибора, особенно в том случае, когда размеры элементов топологии прибора, а также толщины его активных слоёв близки к критическим, т. е. предельным для современного уровня развития технологии. Успехи ультрафиолетовой литографии во многом определяются культурой литографического производства и продуманностью конструктивных решений, но в большей степени – качеством. Именно качество материалов, оборудования и производственных модулей, а также технологического процесса в целом определяют ведущее место ультрафиолетовой литографии в современной микроэлектронике. Рассмотрим основные критерии качества технологического процесса ультрафиолетовой литографии, а также оборудования, непосредственно участвующего в его осуществлении.

Обобщённый критерий оценки качества УФЛО включает в себя технические, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии. Каждый из перечисленных критериев определяется соответствующими параметрами (рис. 5 на 3-й полосе обложки).

Представим процесс потери качества оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии как некую абстрактную модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_k – параметры литографического оборудования, определяющие состояния, которые являются функциями времени. Принадлежность состояния X множеству состояний $G_X (X \in G_X)$ свидетельствует о том, что оборудование иммерсионной литографии отвечает критериям качества. Если значение параметров X_1, X_2, \dots, X_k больше допустимых $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{kp}$, т. е. $X_1 > X_{1p}, X_2 > X_{2p}, \dots, X_k > X_{kp}$, то оборудование иммерсионной ультрафиолетовой литографии не удовлетворяет критериям качества.

Если некоторые из значений параметров X_1, X_2, \dots, X_k будут больше допустимых, а другие меньше, то литографическое оборудование частично удовлетворяет критериям качества. Для условия полного удовлетворения критериям качества $X_1 \leq X_{1p}, X_2 \leq X_{2p}, \dots, X_k \leq X_{kp}$, что соответствует тому, что множество $G_X \subset G_{Xp}$. При этом запас по качеству K_i будет определяться отношением $K_i = X_{ip}/X_i$. Качество по допустимой погрешности УФ излучения $K_1 = X_{1p}/X_1$, качество по поглощению излучения маскирующим материалом шаблона $K_2 = X_{2p}/X_2, \dots$, качество по чистоте технологического объёма $K_{26} = X_{26p}/X_{26}$. Здесь

$X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{26p}$ – допустимые значения погрешности источника УФ излучения, поглощения излучения маскирующим материалом шаблона, показателя фазового сдвига шаблона, монохроматических аберраций, показателя преломления иммерсионной жидкости, числовой апертуры, глубины фокуса, разрешающей способности иммерсионной системы, технической дефектности, времени подготовки технологического процесса, равномерности нанесения иммерсионного резиста, времени сушки иммерсионного резиста, времени подачи иммерсионной жидкости, времени экспонирования, времени удаления иммерсионной жидкости, времени травления, технологической дефектности, адгезии резистивного слоя к полупроводниковой подложке, чистоты поверхности полупроводниковой пластины, шероховатости (R_a) полупроводниковой пластины, плоскостности полупроводниковой пластины, параллельности полупроводниковой пластины, стоимости единицы продукции, окупаемости иммерсионного литографического комплекса, ионизирующего эффекта дальнего ультрафиолетового излучения, чистоты технологического объёма.

X_1, X_2, \dots, X_{26} – фактические значения указанных выше величин.

Тогда обобщённый критерий оценки качества принимается в виде

$$\frac{1}{K_N} = \frac{a_1}{K_1} + \frac{a_2}{K_2} + \dots + \frac{a_{26}}{K_{26}}, \quad (1)$$

где a_1, a_2, \dots, a_{26} – весовые коэффициенты (для определения этих коэффициентов используется метод экспертных оценок),

$$\sum_{i=1}^{26} a_i = 1,$$

а в общем виде обобщённый критерий оценки качества технологии и оборудования иммерсионной ультрафиолетовой литографии записывается как

$$K_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^{26} \left(\frac{a_i}{K_i} \right)}. \quad (2)$$

Выбранный вариант технического решения оборудования УФЛО окончательно оценивается по критерию экономичности. Оптимальным вариантом технического решения оборудования и технологии иммерсионной литографии будет тот, который обеспечивает снижение стоимости совокупной общественной продукции [4]:

$$\sum_{j=1}^{Z_H} Q_j G_{v_j} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Z_H – число типоразмеров конечной совокупности продукции; Q_j – объём производства продукции j -го вида; G_{v_j} – индивидуальная стоимость единицы продукции.

Полученные в этом направлении результаты, в основном, касаются модулей (узлов), отказ которых приводит либо к потере способности выполнения всех его функций одновременно, либо только одной функции. Предложены методы оценки надёжности систем из многофункциональных модулей с произвольным видом компоновки оборудования, задействованного при выполнении технологических операций УФ-литографии [5].

Задача формулируется следующим образом. Пусть УФЛО, выполняющее функцию $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, состоит из m многофункциональных модулей (МФМ), каждый из которых в исходном состоянии выполняет множество функций $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Для каждого модуля обозначим через Φ_1 совокупность УФЛО, задействованного при выполнении функции f_1 . В общем случае множества $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ могут пересекаться, что приводит к взаимозависимости событий, потере способностей модуля выполнять различные функции. По виду пересекаемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ выделим следующие структуры МФМ:

$$(\exists i)(\exists j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j \neq \emptyset]; \quad (4)$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \emptyset]; \quad (5)$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j \neq \Omega]; \quad (6)$$

где $i, j \in N, N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Структура МФМ (4) характеризуется независимостью событий потерять модулем способность выполнять различные функции; структура МФМ (5) соответствует произвольному виду пересекаемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$; структура (6) является частной по отношению к (5).

Условием работоспособности системы является способность выполнения функции $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. При этом каждая функция $f_i \in F$ должна выполняться хотя бы одним МФМ, а время ожидания обслуживания запросов на выполнение функций ФОРМУЛА должно быть не больше заданного предельно допустимого значения. Надёжность системы определим по вероятности безотказной работы (ВБР) [5].

Оценку ВБР провёдем на основе известного комбинаторно-вероятностного метода включения – исключения, позволяющего получить как точную, так и приближенную, с требуемой погрешностью, оценку.

Для МФМ вида (5) ВБР системы Р оценивается как

$$\begin{aligned} P = & \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j}} P(f_i) - \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j \neq l}} P(f_i \vee f_j) + \\ & + \sum_{\substack{i,j,l \in N \\ i \neq j \neq l}} P(f_i \vee f_j \vee f_l) - \dots + \\ & + (-1)^d \sum_{\substack{i,j,\dots,a \in N \\ i \neq j \neq \dots \neq a}} P(f_i \vee f_j \dots \vee f_a) - + \\ & + (-1)^n P(\bigvee_{i=l}^n f_i), \end{aligned} \quad (7)$$

где $P(f_i \vee f_j \dots \vee f_a)$ – вероятность того, что в одном из m МФМ может быть выполнена хотя бы одна функция из множества d функций $\{f_1, f_2, \dots, f_a\}$;

$$P(f_i \vee f_j \dots \vee f_a) = 1 - [1 - p(f_i \vee f_j \dots \vee f_a)]^m.$$

Вероятность сохранения модулем способности выполнения хотя бы одной функции из множества

$$\begin{aligned} p = & (f_i \vee f_j \dots \vee f_a) = \sum_{i \in N} p(f_i) - \\ & - \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j}} p(f_i \wedge f_j) + \sum_{\substack{i,j,l \in N \\ i \neq j \neq l}} p(f_i \wedge f_j \wedge f_l) - \dots + \\ & + (-1)^d \sum_{\substack{i,j,\dots,a \in N \\ i \neq j \neq \dots \neq a}} p(f_i \wedge f_j \wedge \dots \wedge f_a), \end{aligned} \quad (8)$$

где $N_1 = \{i, j, \dots, a\}$, $p(f_i \wedge f_j \dots \wedge f_a)$ – вероятность исправности в модуле УФЛО, задействованного при выполнении функции $\{f_1, f_2, \dots, f_a\}$.

Значение $p(f_i \wedge f_j \dots \wedge f_a)$ определяется как вероятность исправности УФЛО $\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a$. При экспоненциальном распределении времени до отказа

$$\begin{aligned} p(f_i \wedge f_j \dots \wedge f_a) = \\ = \exp(-\nu(\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a)t), \end{aligned}$$

где $\nu(\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a)$ – суммарная интенсивность отказов УФЛО, задействованного при выполнении функций f_1, f_2, \dots, f_a ; t – время работы.

Для МФМ вида (6) ВБР системы вычислим как

$$P = \sum_{k=1}^m C_m^k p_\Omega^k (1-p_\Omega)^{m-k} \prod_{i=1}^n [1 - (1-p_i)^k], \quad (9)$$

где p_Ω – ВБР оборудования МФМ, составляющего множество Ω ; p_i – ВБР оборудования МФ, относящегося к множеству $\Phi_i \setminus \Omega$.

Если потеря модулем различных функций равновероятна ($p_i = p_j = p$), то

$$P = \sum_{k=1}^m C_m^k p_\Omega^k (1-p_\Omega)^{m-k} [1 - (1-p)^k].$$

Для МФМ вида (4) ВБР системы Р вычисляется как

$$P = \prod_{i=1}^n [1 - (1-p_i)^m]. \quad (10)$$

Для МФМ вида (6) ВБР системы

$$\begin{aligned} P = & \sum_{k=m_0}^m C_m^k p_\Omega^k (1-p_\Omega)^{m-k} \times \\ & \times \prod_{i=1}^n \left[\sum_{s=m_0}^m C_m^s p_i^s (1-p_i)^{m-s} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

для МФМ вида (4) ВБР системы

$$P = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{s=m_0}^m C_m^s p_i^s (1-p_i)^{m-s} \right]. \quad (12)$$

Основная проблема в решении задач оценки и выбора вариантов по совокупности показателей состоит в формулировании условий предпочтительности сравниваемых вариантов. В одних случаях для этой цели применяют понятие полезности, с помощью которого производится измерение различных свойств по единой шкале полезности. Полезности свойств объединяются, и упорядочивание вариантов производится по значениям скалярной функции полезности на множестве вариантов. В других случаях наиболее предпочтительный вариант выделяется в результате попарного сравнения вариантов. Но и в том и в другом случае суждение о предпочтительности вариантов строится на основе представления руководителя работ (в дальнейшем лицо, принимающее решение, ЛПР) о достоинствах и недостатках отдельных вариантов, о ценности присущих соответствующим вариантам свойств. Общая методология оценки и сравнения вариантов по совокупности показателей направлена на формализацию ряда

этапов процедуры принятия решений, разработку методов перехода наиболее рациональным и последовательным путём от представления руководителя о ценности свойств к заключению о предпочтительности вариантов. Рассмотрим основные аспекты методологии принятия решений.

Моделью многокритериальной задачи принятия решений в дальнейшем будем называть упорядоченную семёрку

$$G = (N, S, X, f, L, \rho, V), \quad (13)$$

где N – множество модулей УФЛО; S – множество решений (альтернатив, вариантов УФЛО); X – множество показателей; f – отображение множества вариантов в множество векторных оценок; L – множество постановок (типов) задач сравнения вариантов; ρ – система предпочтений лица, принимающего решение; V – множество возможных правил выбора решения УФЛО.

В многокритериальной задаче принятия решения качество варианта УФЛО оценивается совокупностью показателей X_1, X_2, \dots, X_m , $m \geq 2$, которые, считается, полностью характеризуют УФЛО при сравнении вариантов. К таким показателям относятся динамические, надёжностные, ресурсные, технологические и другие. Существенным при формировании набора показателей X является требование различимости уровней (интенсивности) присущих вариантам свойств, определяемых показателями. Интенсивности свойств вариантов могут изменяться дискретно или непрерывно. Для изменения степени важности свойства разрабатывается оценочная шкала показателя, представляющая собой множество оценок $\{x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^r\}$. В дальнейшем используем для обозначения шкалы тот же символ, что и для обозначения показателя X_j . Шкалы, обозначающие множества X , могут быть числовые и нечисловые (верbalные), относиться к различным типам шкал. Наименее совершенной шкалой показателей, применяемых в многокритериальных задачах, является порядковая шкала. Показатели, имеющие порядковую шкалу, называются качественными. Значение качественного показателя имеет смысл сравнивать только по отношениям «больше», «меньше», «равно» – они сохраняются при монотонных преобразованиях.

При сравнении и оценке вариантов по совокупности свойств предполагается, что лицо, принимающее решение, может сопоставлять и делать вывод по предпочтительности интенсивностей различных свойств, изменений интенсивностей свойств, сочетания интенсивностей различных свойств и т. д. на основе своих представлений о ценности свойств. Эти представления и образуют систему предпочтений ρ . Обычно предполагается, что ЛПР, высказывая суждения, действует рацио-

нально, то есть остаётся последовательным, не допускает противоречий и т. д. Формально при таком способе получения информации о предпочтениях система предпочтений описывается отношениями предпочтения на множествах векторных оценок [5].

Решающее правило (метод принятия решений) определяет принцип сравнения векторных оценок с целью установления предпочтительности одних из них по отношению к другим. Оно может быть представлено аналитическим выражением или алгоритмом. Решающее правило должно учитывать особенность используемой в задаче информации о предпочтениях ЛПР, имеющиеся ограничения и принятые допущения, тип решаемой многокритериальной задачи. Этим обусловлено большое число предлагаемых решающих правил, и одна из трудностей решения многокритериальных задач связана с выбором решающего правила, адекватно поставленной задаче. Например, выделение недоминируемых вариантов осуществляется на основе правила, задающего частичный порядок на множестве вариантов. Если решающее правило допускает упорядочение элементов множества вариантов, то процесс упорядочения автоматически определяет любое требуемое число вариантов, которые являются более предпочтительным по сравнению с другими. Если ЛПР действует рационально, то оно должно согласиться с предлагаемым решением. Иначе следует пересмотреть решающее правило или информацию о целях, показателях и оценках по показателям.

В настоящее время передовыми производителями СБИС используются литографические установки с λ равными 248 и 193 нм. В классическом случае применения проекционной оптики минимальные размеры (Critical Dimension) элементов СБИС составляют не менее 90% от λ . Попытка дальнейшего уменьшения размеров элементов приводит к их деструкции при экспонировании в результате негативного влияния явлений дифракции и интерференции. Используемые методы повышения разрешения, в частности метод иммерсии и коррекции оптического эффекта близости требует применения сложных САПР для функционального моделирования процессов литографии и травления, а также обработки больших массивов данных по технологической дефектности.

Решающее правило в задачах выбора наиболее предпочтительного варианта и полного упорядочения на множестве вариантов часто имеют вид функций, зависящих от оценок вариантов по всем показателям. С этой целью вводится новое понятие (ценность, полезность, важность), с помощью которого удается сформулировать решающее правило. Если ЛПР строит свои действия на основе определённых допущений, то на множестве векторных оценок V может быть определена функция

полезности, связывающая это множество с множеством чисел. Используя методы теории полезности, информация о предпочтении ЛПР преобразует в численную информацию о полезности свойств вариантов. Затем эту численную информацию применяют для вычисления полезностей реальных вариантов. Полученные результаты сравнения численных значений полезностей вариантов вновь преобразуются в суждения о предпочтении.

При сравнении вариантов конструктивных решений технологии и оборудования УФЛО предпочтение отдаётся тому из них, который обладает большим значением ожидаемого экономического эффекта и надёжностью.

На этапе принятия решения ещё не известны окончательные параметры нового технического решения, которое будет принято за основу при создании оборудования УФЛО. Экономическое сравнение имеет приближённый характер. Но оно ориентирует разработчика в выборе технических решений для создания оборудования УФЛО по со-

ставляющим элементам и позволяет использовать при этом функционально-стоимостной анализ.

Библиографические ссылки

1. URL: <http://www.eks.fel.mirea.ru> (дата обращения 6.11.12).
2. Формирование плёнок плазменной полимеризацией органических и кремнийорганических мономеров / В.Д. Вернер, С.В. Зеленцов, Д.Б. Ломоносов, В.Г. Шинкаревский // Электронная промышленность. 1988. № 7. С. 16.
3. Зеленцов С.В., Зеленцова Н.В. Современная фотолитография. Нижний Новгород: ННГУ, 2006. 56 с.
4. Экономика машиностроения / Е.М. Карлик, К.М. Великанов, В.Ф. Власов, А.П. Градов и др. [под общ. ред. Е.М. Карлика]. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1985. 392 с.
5. Слободин М.Ю., Царёв Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решений при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. СПб.: ИнфоДа, 2004. 223 с.

УДК 621.002 (035)

Б.В. Великанов, д-р техн. наук, Ю.В. Денисов, канд. техн. наук, проф., А.Ю. Нефедов, И.И. Пахомов (ФГУП «Уральский электромеханический завод», г. Екатеринбург)
nefedov_alexandr@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Рассмотрено решение проблемы совершенствования технологии производства миниатюрных деталей прецизионных приборов. Проанализированы различные виды технологических операций, определяющие структуру механообрабатывающего производства, и установлены основные факторы, влияющие на характер технологических процессов.

Ключевые слова: детали прецизионных приборов, конструктивные особенности деталей, маршрутная технология, операционная технология, стратегия обработки, электроэррозионная обработка, токарная обработка маложёстких деталей, круглошлифовальная обработка, сверление глубоких отверстий, удаление заусенцев.

The problem solution of the production technology improvement for precision devices diminutive details is considered. The different types of technological operations defining structure of machining production structure are analyzed and the major factors influencing on technological processes nature are established.

Key words: precision devices details, design features of details, route technology, operational technology, processing strategy, electrodisscharge processing, turning of low-rigid details, circular grinding, deep hole drilling, deburring.

Технологические аспекты функционирования механообрабатывающего производства играют существенную роль в реализации эффективных процессов изготовления деталей на предприятиях приборостроения. Под технологическими аспектами понимается необходимость решения вопросов, возникающих в ходе проектирования техно-

логических процессов изготовления деталей. На характер и особенности технологических процессов влияют следующие основные факторы: объёмы производства и его серийность; конструктивная форма и размеры обрабатываемых деталей; материал деталей и его свойства; парк используемого оборудования и его возможности. Конст-

руктивные особенности деталей определяют особенности технологического процесса и применяемых технологических решений.

Отличительной чертой современного приборостроения является миниатюризация конструкции приборов, т. е. уменьшение геометрических и массовых характеристик. В объемах механообрабатывающего производства детали небольших размеров занимают значительную долю — до 70 %. Для основной номенклатуры таких деталей характерны: высокая сложность и ажурность конструкций; наличие глубоких и резьбовых отверстий малых диаметров; наличие тонкостенных элементов; высокая точность размеров, взаимного расположения и высокое качество поверхностей (в частности, требование к отсутствию заусенцев и острых кромок).

Технология изготовления и особенности обработки деталей с представленными характеристиками требуют применения специфических подходов к построению структур операций и выбору методов обработки поверхностей. Рассмотрим наиболее характерные группы, охватывающие большую часть номенклатуры миниатюрных деталей, используемых в прецизионных приборах.

Корпусные детали повышенной точности со сложными элементами. Детали этой группы изготавливаются, как правило, из коррозионно-стойких сплавов 12Х18Н10Т, 36НХТЮ, которые обладают невысокими технологическими свойствами: пониженной обрабатываемостью резанием, высокой вязкостью и склонностью к образованию заусенцев.

Конструктивными особенностями таких деталей являются наличие поверхностей с размерами высокой степени точности по 6–7-му квалитетам (рис. 1), малая жесткость (рис. 2) и наличие отдельных нетехнологичных, сложных в исполнении элементов (рис. 3).

Для получения деталей с высокой точностью размеров поверхности требуется использование чистовых токарных и круглошлифовальных операций, а также электроэроздионной обработки и доводочных операций. Каждый из видов обработки определяет особые требования к оборудованию, оснастке, инструменту и режимам резания.

При токарной обработке радиальное и торцевое бение шпинделя не должно превышать 0,01 мм, точность продольного и поперечного перемещения салазок относительно оси и торца шпинделя должна составлять 0,01 мм/100 мм. Используемая оснастка должна обеспечить бение базовых поверхностей зажимной оснастки — кулачков в трёхкулачковых патронах, мембранные, цанг не более 0,015 мм. Для обработки рекомендуются резцы с положительными передними углами 7° и передними поверхностями цилиндрической фор-

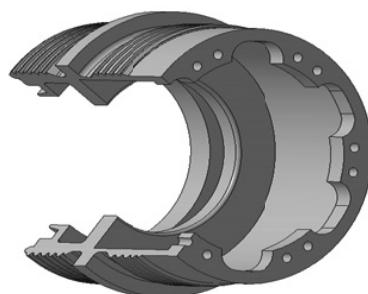


Рис. 1. Корпусная деталь типа «корпус»

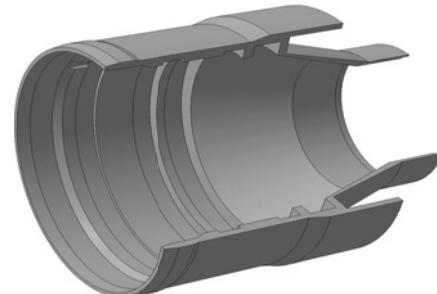


Рис. 2. Корпусная маложёсткая деталь

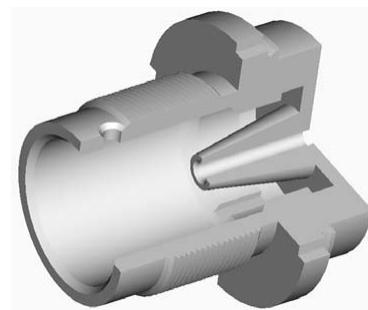


Рис. 3. Корпусная деталь с нетехнологичным элементом — торцевой канавкой

мы радиусом 5 мм. Данная геометрия обеспечивает необходимую размерную стойкость инструмента и минимизацию величины заусенцев.

Рекомендуемые режимы резания для чистовой обработки: скорость резания $v = 60$ м/мин, подача $f = 0,025$ мм/об, глубина резания $t = 0,025$ мм.

При выполнении круглошлифовальной операции требуется: радиальное бение шпинделя не более 0,005 мм; достигаемая цилиндричность обработки на образцах не более 0,005 мм/100 мм; соосность центров задней и передней бабки не более 0,005 мм. Цилиндрические оправки для шлифования деталей с базой на отверстие должны быть изготовлены по 5-му квалитету.



Рис. 4. Деталь точной механики типа «храповик»

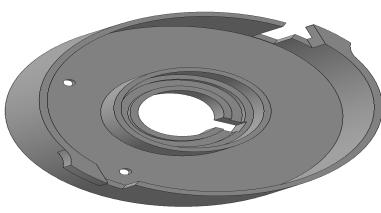


Рис. 5. Деталь точной механики типа «барабан»

В качестве инструмента для выполнения операции используются шлифовальные круги 1A1 – 1.350×40×127×10 CBN30/125/100R, при этом радиальное биение круга не более 0,003 мм обеспечивается его балансировкой и правкой. При шлифовании скорость резания $v = 50$ м/мин, подача $f = 0,001\text{--}0,003$ мм/ход, время выхаживания 10–20 двойных ходов.

Электроэррозионная обработка поверхностей с высокой степенью точности выполняется на современных проволочно-вырезных станках, при этом достигаемая точность обработки образца в форме параллелепипеда с размерами 100×100×100 мм находится в пределах 0,008 мм. Для обработки деталей необходимо использовать не универсальную, а только специализированную оснастку, проектируемую индивидуально под каждую операцию. Базовые отверстия приспособлений имеют позиционный допуск $R 0,005$ мм, при этом базовые поверхности деталей должны выполняться не грубее чем по 7-му квалитету, с позиционным допуском $R 0,015$ мм. В качестве инструмента используется латунная проволока диаметром от 0,1 до 0,25 мм.

В доводочных операциях для получения поверхностей с допуском по 5–6-му квалитетам в качестве оснастки используются доводочные плиты с плоскостью не более 0,0015 мм на площади 100×100 мм, а также притирки для отверстий. В качестве инструмента для чистовой доводки применяют абразивные и алмазные пасты с зернистостью 5–7 мкм.

Для корпусных деталей с малой жёсткостью технологический маршрут характеризуется наличием операций термостабилизации и использованием стратегии постепенного снятия припуска при условии сохранения точности формы базовых поверхностей. В токарных операциях для захвата маложёстких деталей используется такая специализированная оснастка, как мембранные, разжимные оправки, цанги с радиальным и торцевым биением не более 0,01 мм. Для токарной обработки в свободном состоянии применяют планшайбы и токарные оправки с базой на несосновые отверстия. Для реализации операционной технологии используют острозаточенные резцы с

положительными передними углами, а также режимы резания, обеспечивающие сохранение жёсткости деталей и удовлетворительную стойкость инструмента: скорость резания $v = 40$ м/мин, подача $f = 0,015$ мм/об, глубина резания $t = 0,01\text{--}0,015$ мм. Технология круглошлифовальной обработки деталей малой жёсткости не отличается от аналогичной технологии обработки деталей с высокой точностью геометрических размеров поверхности.

Особенностью электроэррозионной обработки деталей малой жёсткости является использование оснастки, обеспечивающей небольшое усилие захвата, отсутствие деформации и сохранение формы детали.

Детали точной механики. К этой группе относятся контакты сложной формы, корпусы малых размеров, барабаны, роторы, обечайки, храповики (рис. 4, 5).

Конструктивные особенности этих деталей характеризуются общими признаками и особенностями отдельных элементов, выполнение которых требует определённых технологических приёмов. Общими признаками деталей являются: малые размеры – наибольший характерный размер деталей составляет 10 мм; высокая точность основных элементов – по 7–8-му квалитетам; высокие требования к шероховатости функциональных поверхностей $Ra 0,32\text{--}1,25$ и отсутствию заусенцев. Для этих деталей можно выделить отдельные элементы, оказывающие существенное влияние на технологию изготовления: гладкие сквозные отверстия диаметром менее 1,0 мм с полем допуска по 7-му квалитету и позиционным допуском расположения $R 0,015$ мм; сквозные и глухие резьбовые отверстия минимальным размером $M1$; цапфы диаметром менее 1 мм с полем допуска по 6-му квалитету; усики и лепестки, зубья храповиков, открытые и закрытые пазы по 7-му квалитету; сложные поверхности с допуском отклонения формы 0,015 мм и т. д.

Для изготовления деталей этой группы, наряду с коррозионно-стойкими сплавами 12Х18Н10Т и 36НХТЮ, используются медные – бериллиевая бронза БрБ2 в облагороженном виде с твёрдостью $HV > 330$ кгс/мм², алюминиевые сплавы Д16Т,

B95, малоуглеродистые стали 10880. Используемые бериллиевые бронзы имеют высокие пределы прочности, упругости, текучести и усталости, однако обладают невысокими технологическими свойствами. Коэффициенты обрабатываемости для этих материалов имеют значения $\sim K = 0,25$, сплавы на основе Al–Cu хорошо обрабатываются резанием и свариваются, медные сплавы обладают хорошими технологическими и антифрикционными свойствами.

Важной технологической операцией для улучшения обрабатываемости малоуглеродистой стали резанием является отжиг второго рода, позволяющий измельчить зерно, уменьшить структурную неоднородность и дисперсность ферритно-карбидной смеси. Обработка резанием малоуглеродистых сталей, в структуре которых преобладает мягкая ферритная составляющая, характеризуется низкой стойкостью инструмента и высокой шероховатостью поверхности. Такой эффект обусловлен в основном налипанием обрабатываемого металла на поверхность инструмента. Применение отжига второго рода приводит к появлению в структуре материала крупных частиц пластинчатого перлита, что существенно уменьшает налипание металла на режущую кромку инструмента. Улучшения обрабатываемости при применении отжига второго рода добиваются использованием ускоренного охлаждения от температуры аустенизации и предварительным применением холодной пластической деформации для материала обрабатываемых деталей.

Конструктивные свойства деталей определяют особенности маршрутной технологии, используемых оснастки и инструмента. Например, для выполнения отверстий малого диаметра с небольшим допуском на диаметр и малым позиционным допуском целесообразно использование координатно-расточных станков, обрабатывающих центров фрезерного типа. При этом должна быть обеспечена точность позиционирования и повторяемость размеров 0,003 мм при максимальных оборотах шпинделя 16 000 об/мин и отклонение от перпендикулярности оси шпинделя не более 0,01 на длине 100 мм, а используемое приспособление должно обеспечить точность позиционирования детали в пределах 0,005 мм. Особые требования для выполнения отверстий малого диаметра предъявляются к зажимным патронам, которые должны обеспечить точность бieniaия не более 0,003 мм. Для этого используются патроны гидропластовые и с термозажимом. Определённые требования предъявляются к инструменту: сверло из твёрдого сплава должно иметь точность хвостовика по 5-му квалитету; биение режущих кромок должно составлять не более 0,002 мм; размеры перемычки — $0,05 \pm 0,02$ мм; размеры

ленточки на режущих кромках — $0,02 \pm 0,01$ мм. Для обеспечения стойкости инструмента рекомендуется скорость резания $v = 30$ м/мин, подача $f = 0,003$ мм/об. В качестве финишной операции используется развёртывание, причём требования к развёрткам ана-логичны рассмотренным выше требованиям к свёрлам.

Общими направлениями и особенностями технологического процесса изготовления деталей этой группы являются широкое применение электроэррозионной и комплексной токарно-фрезерной обработки. Из-за высоких требований к шероховатости поверхностей деталей малых размеров и требований к отсутствию заусенцев на слесарных операциях используются микроскопы с увеличением в 20–40 раз. Этим определяется высокая доля ручного труда — до 70 % трудоёмкости технологического процесса составляют слесарные и доводочные операции.

Детали контактной группы. К этим деталям, являющимся основной частью разъёмов, относятся наиболее массовые детали типа «штырь», «гнездо», «хвостовик» (рис. 6–8). К ним предъявляют повышенные требования по точности расположения отдельных элементов, допускам на геометрические размеры и состоянию поверхности. Эти параметры определяют надёжную и безотказную работу разъёмов.

В качестве материалов для деталей этой группы применяются коррозионно-стойкие стали 12Х18Н10Т, никелевые сплавы НП2, прецизионные сплавы 29НК, медные сплавы — бериллиевая бронза БрБ2 в облагороженном виде с твёрдостью $HV > 330$ кгс/мм².

Общими признаками, характеризующими эти детали, являются: малые геометрические размеры



Рис. 6. Деталь контактной группы типа «хвостовик»

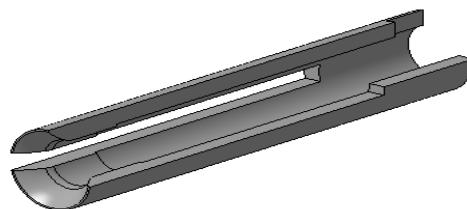


Рис. 7. Деталь контактной группы типа «гнездо»

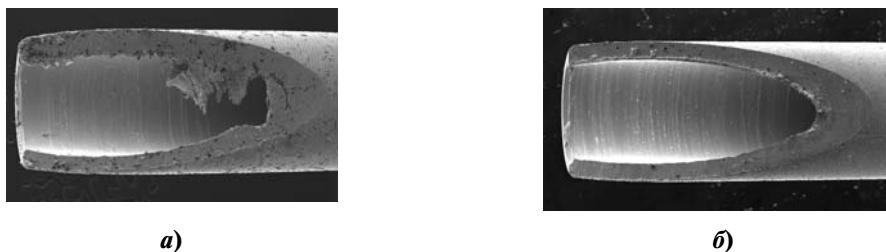


Рис. 8. Деталь контактной группы типа «хвостовик» из материала НП2 до выполнения мероприятий по управлению заусенцами (а) и после мероприятий по управлению заусенцами (б)

(диаметр деталей составляет от 0,6 до 4,0 мм); отношение длины к диаметру $l/d = 5–30$, что определяет малую изгибную жёсткость деталей при обработке. Наружные цилиндрические контактные поверхности штырей имеют диаметр от 0,6 до 1,2 мм с допуском по 9-му квалитету, внутренняя цилиндрическая контактная поверхность гнёзд выполняется в виде отверстий диаметром от 0,8 до 1,2 мм с допуском по 10-му квалитету. Хвостовые поверхности этих деталей обрабатываются для последующей пайки со скосами, осевыми и технологическими радиальными отверстиями (см. рис. 8). Хвостовые части этих деталей имеют лыски, пазы шириной 0,3–0,6 мм, глубиной до 8 мм и допуском по 12-му квалитету.

Технологические особенности производства определяются большим объёмом выпуска данных деталей – до 100 000 в год. Существенное влияние на маршрутную и операционную технологии оказывает малая изгибная жёсткость деталей, характеризуемая отношением длины детали к диаметру l/d . Большое влияние на технологический процесс оказывает обрабатываемость материала деталей и склонность к образованию заусенцев. Например материал БрБ2, в отличие от сплава НП2, обладает высокими технологическими свойствами. Технологический процесс изготовления деталей из материала БрБ2 включает токарную и слесарную программные операции. В технологическом процессе изготовления деталей из сплава 29НК присутствуют операции, выполняемые на станках с ручным управлением. Трудоёмкость операций по удалению заусенцев на деталях из сплава 29НК существенно выше, чем у деталей из бронзы БрБ2. Поэтому к деталям из этого сплава применяют дополнительные меры по уменьшению высоты заусенцев и их рациональному направлению – выбор последовательности выполнения токарных и фрезерных операций, контроль состояния режущей кромки инструмента.

Конструктивные особенности деталей определяют наиболее оптимальное решение по выбору оборудования для их изготовления. Достаточно

широко используются для обработки автоматы продольного точения с программным управлением. Станки этой группы обладают конструктивными особенностями, необходимыми для изготовления длинных, тонких деталей, например наличием люнетного узла и подвижной шпиндельной бабки. Кроме того, оборудование имеет возможность выполнять операции фрезерования и несоосного сверления, обработку со стороны отрезанной части детали после её переустановки. Эти станки имеют следующие характеристики: максимальные обороты основного и контршпинделя не менее 16 000 об/мин; соосность фронтального шпинделя с осью вращения люнета $R 0,01$ мм; соосность шпиндельной бабки с люнетным узлом $R 0,025$ мм; биение люнетного узла 0,005 мм; биение контршпинделя 0,010 мм.

В качестве примера рассмотрим технологические особенности изготовления хвостовика разъёма из никелевого сплава НП2. Особенностью этого материала является повышенная мягкость и, как следствие, склонность к образованию заусенцев. При обработке деталей на автоматах продольного точения принимаются меры по управлению параметрами заусенцев – минимизация их размеров и приданье удобного для удаления направления (см. рис. 8). Задача решается по следующим направлениям: выбор материала и геометрии применяемого режущего инструмента, режимов резания и стратегии обработки. При обработке деталей из сплава НП2 применяются резцы из быстрорежущей стали Р18 с передним углом 11° и радиусной формой передней поверхности. Режущая кромка резца имеет ленточку радиусом 0,02 мм. Скорость резания составляет $v = 30$ м/мин, подача $f = 0,03$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм. Используется масляная СОЖ Motorex Inox 100 с температурой не выше 25 °C, при этом станки оборудованы устройством для охлаждения масла.

Стратегия обработки предусматривает последовательность обработки таких элементов детали, как осевого отверстия диаметром от 0,8 до 1,5 мм с допуском по 12-му квалитету, соотношением

$l/d = 3–6$ и радиального отверстия диаметром от 0,5 до 0,7 мм скоса. Наиболее рациональной является следующая технология: проточка наружного диаметра с припуском 0,2 мм; сверление радиального и осевого отверстий, фрезерование скоса; чистовая обработка наружного диаметра; повторное сверление радиального отверстия; развертывание осевого отверстия; повторное фрезерование скоса. При такой последовательности обработки размеры заусенцев уменьшаются в 3–4 раза и принимают удобное для последующего удаления направление, что позволяет существенно снизить трудоёмкость ручных операций по снятию заусенцев.

Детали релейной группы. К этой группе относятся детали типа «якорь», «сердечник с полюсами», «монтажный щит», «панель», «защитный колпак» (рис. 9–12). Эти детали в большом количестве используются в прецизионных приборах. К ним предъявляются достаточно высокие требования по магнитным свойствам, состоянию поверхности (шероховатости), допускам на геометрические размеры, которые определяют величину зазоров в приборах и величину магнитного потока.

Основными материалами для этих деталей являются стали 10880 и 20880, сплав 12Х18Н10Т. Вместе с тем, наряду с общими свойствами, малоуглеродистые стали 10880 и 20880 обладают некоторыми отличиями, которые следует учитывать при механической обработке. К общим свойствам малоуглеродистых сталей, в структуре которых преобладает мягкая ферритная составляющая, следует отнести их влияние на низкую стойкость инструмента и получаемую при обработке высокую шероховатость поверхностей деталей. Такой эффект в основном обусловлен налипанием обрабатываемого металла на поверхность инструмента, что можно уменьшить применением отжига второго рода, полезное влияние которого было отмечено при анализе деталей группы точной механики. Для режущих инструментов при обработке стали 10880, как более вязкого материала, рекомендуются большие передние углы $\sim 15^\circ$ и задние $\sim 8^\circ$. Для обработки стали 20880, как более твёрдой по сравнению со сталью 10880, можно рекомендовать несколько меньшие передние углы $\sim 10^\circ$ при том же значении задних углов $\sim 8^\circ$.

Характерными конструктивными элементами деталей релейной группы являются: малая толщина стенок щитов и колпаков 0,2–0,3 мм (см. рис. 10); преобладание плоских поверхностей, в том числе расположенных под углом к основным плоскостям с малым угловым допуском (см. рис. 11); наличие большого количества пересекающихся поверхностей у деталей типа «якорь», «сердечник с полюсами». Детали кольцеобразного вида имеют глухие и сквозные радиальные от-



Рис. 9. Деталь релейной группы типа «щит»

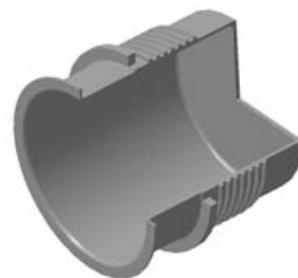


Рис. 10. Деталь релейной группы типа «колпак»

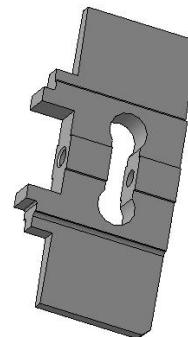


Рис. 11. Деталь релейной группы типа «якорь»

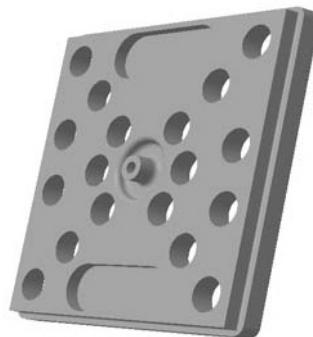


Рис. 12. Деталь релейной группы типа «панель»

верстия диаметром от 0,4 до 0,5 мм, у деталей типа «панель» присутствуют аксиальные отверстия диаметром от 1,5 до 2,5 мм и позиционным допуском $R\ 0,05$ мм, шероховатостью в пределах $Rz\ 20-Rz\ 5$ (см. рис. 12). Осевые отверстия в деталях типа «якорь» имеют диаметр от 1,0 до 1,5 мм с допуском по 7-му квалитету при соотношении $l/d = 10$.

Технология изготовления деталей типа «щит» и «колпак» ориентирована на высокую степень использования токарных станков с ЧПУ, штамповки для вырубки монтажных окон, систем отверстий и пазов, электрохимических методов удаления заусенцев с пересечения поверхностей.

В качестве примера рассмотрим особенности технологического процесса изготовления детали типа «якорь». Заготовка получается вырубкой из листа, далее следуют фрезерные и плоскошлифовальные операции для обеспечения высокой степени точности геометрических размеров базовых плоских поверхностей. Эти операции выполняются на сверлильных станках с использованием кондуктора, так как отверстия таких деталей имеют допуск по 11-му квалитету, а позиционный допуск не превышает $R\ 0,075$. Позиционный допуск расположения кондукторных втулок должен быть не больше $R\ 0,015$ мм, а зазор между втулкой и сверлом – не более 0,03 мм.

Следует отметить высокую трудоёмкость удаления заусенцев с пересечения отверстий, определяемую свойствами материала – мягкостью и повышенной вязкостью.

Достаточно часто встречающимися элементами этой группы деталей являются цапфы. Выполняемые токарные операции по обточке цапф имеют свои технологические особенности. Цапфы должны иметь отклонение от цилиндричности не более 0,007 мм, а соосность – не более 0,015 мм. Токарные оправки должны иметь точ-

ность расположения базовой плоскости относительно оси вращения 0,01 мм. Рабочая часть резцов должна быть изготовлена из сплава КНТ16, обладающего низкими технологическими свойствами для пайки и заточки, но обеспечивающего хорошую шероховатость поверхности деталей и имеющего высокую стойкость. При токарной обработке, учитывая стойкость инструмента и свойства материала обрабатываемых деталей, наиболее рациональными являются следующие режимы: скорость резания $v = 10$ м/мин (ограничена дисбалансом и динамической неуравновешенностью оправки), подача $f = 0,015$ мм/об, глубина резания $t = 0,1$ мм.

Для уменьшения размеров заусенцев и придания им рационального направления широко используется такой вид обработки, как штамповка монтажных окон, что позволяет уменьшить объём ручных слесарных операций и увеличить производственную мощность.

Заключение. Представлены структурирование и анализ типовой номенклатуры миниатюрных деталей прецизионных приборов. Установлены наиболее характерные признаки, позволяющие определить общие закономерности выбора параметров технологического процесса для каждой группы деталей при их обработке. Для снижения трудоёмкости и повышения эффективности производства деталей разработаны предложения, включающие мероприятия: конструктивные – повышение технологичности деталей и технологические – совершенствование маршрутной и операционной технологий. Рассмотрены особенности маршрутных и операционных технологий, которые определяются конструктивными свойствами деталей и позволяют снизить трудоёмкость их изготовления, повысить эффективность работы механообрабатывающего производства и ритмичность работы сборочного производства.

Уважаемые авторы и читатели журнала!

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал «Автоматизация и современные технологии» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 681.3.07

И.Ф. Дьяков, д-р техн. наук, проф., А.В. Попович
(Ульяновский государственный технический университет)

i.dyakov@ulstu.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ В САМ-СИСТЕМЫ

Предложен метод интеграции интеллектуальных алгоритмов в системы подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Рассмотрено применение нейронных сетей в виде многослойного персептрона с алгоритмом обратного распространения ошибки и обучением с учителем.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, искусственный интеллект, типовые элементы, проектирование обработки, САМ-системы, нейронные сети.

Method of the intelligent algorithms integrating to the control program preparation systems for CNC machine tools is proposed. Neural networks application in the form of a multilayer perceptron with back propagation algorithm and teaching with the teacher is considered.

Key words: intellectual systems, artificial intellect, standards elements, machining planning, CAM-system, neural networks.

Введение. Постоянное развитие и повсеместное распространение высокоскоростных и производительных обрабатывающих центров, оснащённых системами ЧПУ, требуют снижения временных затрат на подготовку управляющих программ. Причиной является высокая стоимость данного оборудования, заставляя предприятия в условиях современного рынка эксплуатировать станки с максимально высоким коэффициентом использования. Поэтому необходимо обеспечить непрерывную загрузку оборудования, что в большинстве случаев не выполняется из-за разницы во временных затратах между изготовлением и описанием этапов механической обработки детали. В настоящее время для решения этой актуальной и приоритетной задачи необходимо разработать перспективную и максимально эффективную систему.

Современные CAD/CAM-системы [1, 2, 3] предлагают весьма ограниченные решения по данному направлению автоматизации, делая процесс программирования времёмким и низкоэффективным. При этом большинство решений всё также принимаются человеком, несмотря на автоматизированные функции, например создание режущего инструмента или подбор последовательности его применения в зависимости от изначально заданных параметров элемента модели детали.

Негативными составляющими существующих процессов подготовки управляющих программ средствами САПР технологического процесса производства (ТПП) являются:

человеческий фактор, приводящий к ошибочным действиям, зачастую даже не связанным с уровнем знаний и опытом человека;

высокие временные затраты, зависящие от уровня владения человеком компьютеризированной системой;

определенное количество итераций, зависящее от наименования операций механической обработки, количества позиций в файле шаблона или свойств типовых элементов (ТЭ) деталей.

Основная часть. Указанные составляющие можно существенно снизить, интегрировав в современные САПР ТПП интеллектуальные алгоритмы. Принятие решений со стороны системы является ключевым фактором в вопросах оптимизации процессов подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Учитывая, что процесс обучения используемой интеллектуальной системы включает проверку результатов обучения, осуществляемой оператором, можно утверждать о снижении вероятности принятия самой системой ошибочного решения в отличие от присутствия человеческого фактора, приводящего к появлению потенциальных ошибок.

Предложена реализация интеграции интеллектуальных алгоритмов в САМ-системы на примере обработки ТЭ деталей, представляющих собой стандартные объекты, выраженные в виде отверстий, карманов и пазов, которые представлены на рис. 1. К таким элементам, часто применяемым на производстве, предъявляют более жёсткие требования по режимам обработки, допускам и посадкам, влияющим на повышение трудоёмкости обработки в несколько раз.

На основе анализа подходов описания обработки ТЭ деталей и подбора необходимого режущего инструмента в САПР принято решение о создании гибкой, интеллектуальной и автоматизированной системы с использованием техноло-

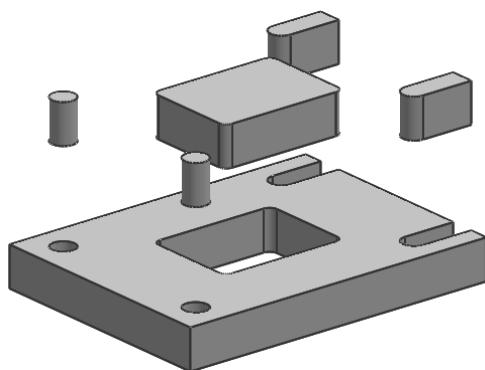


Рис. 1. Стандартные механо-обрабатываемые типовые элементы

гий на основе искусственных нейронных сетей, обеспечивающих снижение трудоёмкости и точности обработки. Система получила название i-feature, принципиальная схема работы которой показана на рис. 2.

Таким образом, разработанная методика использована в качестве примера при обработке отверстий сверлением. В любой детали при механической обработке существует ряд входных и выходных параметров, отвечающих за последующую успеш-

ную генерацию траектории перемещения режущего инструмента. Часть этих параметров напрямую соединяют друг с другом, а часть прогнозируют.

Суммарный набор данных передаётся в систему генерации траектории перемещения режущего инструмента, а подготовка этих данных осуществляется в линейной и интеллектуальной структурах.

Линейная структура (табл. 1) определяет прямые зависимости, например между параметрами ТЭ и режущим инструментом (диаметр отверстия равен диаметру сверла, необходимого для его обработки).

Интеллектуальная структура (табл. 2) обучается учителем, определяет прогнозируемые параметры механической обработки при заданных входных данных.

Структура сети представлена в виде многослойного персептрона с тремя парами входов-выходов и пятью скрытыми слоями. Количество скрытых слоев n определялось по формуле $2n-1$. Выбраны следующие параметры входов: $L_{\text{отв}}$ – глубина отверстия; $M_{\text{детали}}$ – материал детали; $M_{\text{сверла}}$ – материал сверла и выходов: $N_{\text{проходов}}$ – количество проходов; $V_{\text{рез}}$ – скорость резания; $F_{\text{подача}}$ – подача.

Алгоритм обратного распространения ошибки – итеративный градиентный алгоритм обучения, который используется для минимизации средне-



Рис. 2. Принципиальная схема работы системы i-feature

Таблица 1

Линейные параметры отверстия

Параметр	Вход	Выход
Диаметр	$D_{\text{отв}}$	$D_{\text{сверла}}$
Глубина	$L_{\text{отв}}$	$L_{\text{реж. части}}$
Угол дна	$A_{\text{дна}}$	$A_{\text{реж. кромки}}$
Величина фаски	$Ch_{\text{фаски}}$	$Ch_{\text{фасочника}}$
Угол фаски	$Ang_{\text{фаски}}$	$Ang_{\text{фасочника}}$
Радиус фаски	$R_{\text{фаски}}$	$R_{\text{пластины}}$
Шаг резьбы	$P_{\text{резьбы}}$	$P_{\text{метчика}}$
Диаметр под резьбу	$D_{\text{отв}}$	$D_{\text{сверла}}$
Направление резьбы	$L_{\text{левое}}, R_{\text{правое}}$	$L_{\text{метчик}}, R_{\text{метчик}}$
Количество ступеней	$N_{\text{ступеней}}$	$N_{\text{итераций}}$

Таблица 2

Пары входов-выходов сети при сверлении

Обычное отверстие: обработка сверлением		
Параметр	Вход	Выход
Глубина	$L_{\text{отв}}$	$N_{\text{проходов}}$
Материал детали	$M_{\text{детали}}$	$V_{\text{рез}}$
Материал сверла	$M_{\text{сверла}}$	$F_{\text{подача}}$

квадратичного отклонения текущих от требуемых выходов многослойных нейронных сетей с последовательными связями.

Согласно методу наименьших квадратов, минимизируемой целевой функцией ошибки нейронной сети $E(w)$ является величина

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{jk} (y_{jk}^{(Q)} - d_{jk})^2 \rightarrow \min,$$

где $y_{jk}^{(Q)}$ – реальное выходное состояние нейрона j выходного слоя нейронной сети при подаче на входы k -го образа; d_{jk} – требуемое выходное состояние этого нейрона.

Суммирование ведётся по всем нейронам выходного слоя и обрабатываемым сетью образом. Минимизация методом градиентного спуска обеспечивает подстройку весовых коэффициентов следующим образом:

$$\Delta w_{ij}^{(q)} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \quad (1)$$

где w_{ij} – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей i -й нейрон слоя $(q-1)$ с j -м ней-

роном слоя q ; η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

Теперь можно записать выражение (1) в раскрытом виде:

$$\Delta w_{ij}^{(q)} = -\eta \delta_j^{(q)} y_i^{(q-1)}. \quad (2)$$

Иногда для придания процессу коррекции весов некоторой инерционности, сглаживающей резкие скачки при перемещении по поверхности целевой функции, выражение (2) дополняется значением изменения веса на предыдущей итерации:

$$\Delta w_{ij}^{(q)}(t) = -\eta(\mu \Delta w_{ij}^{(q)}(t-1) + (1-\mu) \delta_j^{(q)} y_i^{(q-1)}),$$

где μ – коэффициент инерционности; t – номер текущей итерации.

Сети на первом шаге попеременно в случайном порядке предъявляют все тренировочные образы, чтобы она не забывала одни параметры по мере запоминания других.

Из выражения (1) следует, что эффективность обучения заметно снижается, если выходное зна-

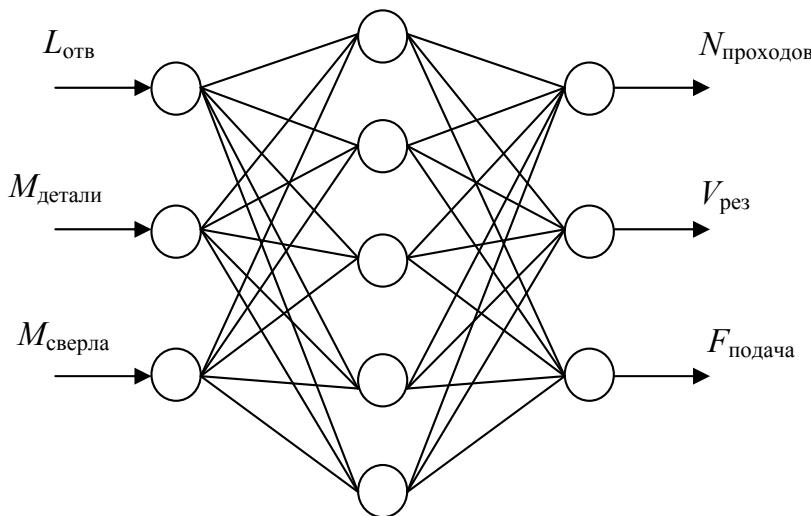


Рис. 3. Структура нейронной сети для элементарного отверстия

чение стремится к нулю. При двоичных входных векторах в среднем половина весовых коэффициентов не будет корректироваться, поэтому область возможных значений выходов нейронов $0, \dots, 1$ желательно сдвинуть в пределы $-0,5 - +0,5$, что достигается простыми модификациями логистических функций.

Необходимая нейронная сеть для элементарного отверстия представлена на рис. 3.

Количество весов может быть велико, поэтому обучение является сложным и длительным процессом. После многократного предъявления примеров веса сети стабилизируются, причём сеть даёт правильные ответы на все (или почти все) примеры из базы данных. В этом случае говорят, что сеть обучена. В программных реализациях можно видеть, что в процессе обучения значение ошибки (сумма квадратов ошибок по всем выходам) постепенно уменьшается. Когда значение ошибки достигает нуля или приемлемо малого уровня, обучение останавливают, т. е. сеть готова к прогнозированию.

Важно отметить, что вся информация, которую сеть приобретает о задаче, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения сети зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают задачу. Считается, что для полноценной тренировки требуется хотя бы несколько десятков (а лучше сотен) примеров.

Аналогичным образом создаются нейронные сети для других видов ТЭ. CAD/CAM-система по окончании работы алгоритма распознавания и верификации ТЭ формирует локальную базу данных, в которой указаны параметры для каждого конкретного элемента. Часть из этих параметров используется в качестве входов для нейронной

сети, которые представляют при обучении с учителем. При этом по завершении обработки данных линейной структуры включается интеллектуальный алгоритм i-feature, основанный на обучении нейронных сетей, и принимает решения о дальнейшей генерации траекторий перемещения режущего инструмента.

Заключение. Комплексная интеграция систем искусственного интеллекта в различные разделы CAD/CAM/CAPP-систем, а также развитие универсальных форматов обмена данными между пакетами и системами ЧПУ позволяют максимально сократить влияние человеческого фактора на принятие решений, что существенно снизит потенциал возникновения ошибочного действия при ручном вводе. В идеализированной модели такого рода систем конечному пользователю предоставляется диалоговый режим для принятия окончательного решения, минуя серию промежуточных, которые могут быть сформированы на основе реальных данных предприятия и знаний наиболее опытных его сотрудников. Также определённый эффект будет достигнут при использовании полученных разработок операторов с низкой квалификацией и малым опытом работы с учётом потенциальной интеграции интеллектуальных функций в современные САПР.

Библиографические ссылки

1. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / пер. с англ. Ю.А. Зуева, В.А. Точенова. М.: Мир, 1992. 105 с.
2. Park S.C. Knowledge capturing methodology in process planning // Computer-Aided Design. 2003. № 35 (12). P. 1109–1117.
3. Kang T.S., Nnaji B.O. Feature representation and classification for automatic process planning systems // Journal of Manufacturing Systems. 2002. № 12(2). P. 133–145.

УДК 621.048

М.А. Тамаркин, д-р техн. наук, проф., **Э.Э. Тищенко**, канд. техн. наук, доц., **А.А. Тихонов**
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

lina_tishenko@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Разработана методика проектирования технологических процессов гидроабразивной обработки. Проведён анализ контактных взаимодействий частиц среды с поверхностью обрабатываемой детали. Получены зависимости среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, съёма металла с поверхности обрабатываемой детали, времени обработки.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, качество поверхности, съём металла с поверхности детали.

Methodology of the hydroabrasive treatment technological processes designing is developed. The analysis of the environment particles contact interactions with a machined detail surface was carried out. Dependences of the profile established roughness average arithmetic deviation, metal removal from a machined detail surface and machining time are received.

Key words: hydroabrasive processing, surface quality, metal removal from a detail surface.

Повышение качества продукции связано с совершенствованием известных и разработкой новых эффективных методов финишной обработки, среди которых ведущее место занимают методы абразивной обработки, обеспечивающие требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а также высокую надёжность и долговечность машин в процессе эксплуатации.

Гидроабразивная обработка является одной из разновидностей обработки деталей свободными абразивами, позволяет обрабатывать фасонные детали, которые нельзя обрабатывать на станках. Данный вид обработки не очень распространён, так как мало изучен.

Процесс гидроабразивной обработки (ГАО) заключается в направлении струи суспензии, состоящей из воды и частиц абразивных материалов, на обрабатываемую поверхность заготовки. Струя подвергается воздействию потока сжатого воздуха, который увеличивает скорость истечения суспензии из сопла. В результате такой обработки образуются чистые матовые поверхности без направленных рисок, характерных для лазерной обработки материалов. Действие режущих кромок абразивных частиц на обрабатываемую поверхность непродолжительно и имеет ударный характер.

Химически активные вещества, добавленные в суспензию, улучшают действие абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, процесс ускоряется, и количество удаляемого металла увеличивается.

Компактность струи суспензии определяет площадь сечения струи при встрече с обрабатываемой поверхностью и является главным фактором, обеспечивающим наибольшее удельное давление струи суспензии на заготовку. Движение струи сопровождается бомбардировкой обрабатываемой поверхности абразивными частицами.

В отличие от процессов резания связанным абразивом, после которых на обработанной поверхности остаются риски и микротрешины, струйная ГАО не создает направленной шероховатости, обеспечивает упрочнение обрабатываемой поверхности, вследствие чего повышается усталостная прочность обработанных деталей.

Все процессы механической обработки металла сопровождаются значительными усилиями и выделением в зоне резания большого количества тепла, вызывающего пластическую деформацию поверхностного слоя. При струйной ГАО температура обрабатываемых деталей не изменяется. Микронагрев, вызываемый отделением стружки абразивной частицей, устраняется потоком суспензии, сопровождающим абразивную частицу.

Струйную ГАО целесообразно применять для обработки сложных поверхностей, так как кроме значительного снижения времени обработки возможно механизировать процесс отделочных операций и улучшить условия труда.

Характер взаимодействия абразивных частиц, находящихся в струе, с поверхностью определяет выходные параметры процесса (производительность и качество обработки). В плане абразивного воздействия струйной ГАО можно рассматри-

вать как процесс эрозии потоком абразивных частиц обрабатываемой поверхности. Для установления физической картины явлений, происходящих при изнашивании пластичного материала потоком абразивных частиц, необходимо первоначально рассмотреть износ, вызываемый ударом одиночной частицы [1].

Материал при воздействии на обрабатываемую поверхность потока абразивных частиц удаляется в результате взаимодействия нескольких одновременно протекающих процессов, обусловленных отдельным или совместным влиянием компонентов потока этих частиц. При рассмотрении съёма материала струёй абразивных частиц необходимо учитывать соударения частиц между собой внутри набегающего потока; дробление отдельных частиц; экранирование обрабатываемой поверхности отскакивающими от неё частицами; диапазон углов падения частиц в определённый момент времени; влияние обрабатываемой поверхности на траекторию движения абразивных частиц; подповерхностное повреждение материала вследствие многократных ударов абразивными частицами; адсорбционный эффект понижения прочности обрабатываемого материала на границе раздела обрабатываемой поверхности и потока [2].

ГАО применяется при изготовлении и ремонте изделий машиностроения. Основные направления применения ГАО следующие: отделка деталей особо сложной конфигурации; уменьшение шероховатости поверхности при соблюдении высокой точности изготовления детали; получение чистой поверхности без направленных следов обработки, с созданием наклёпа для повышения усталостной прочности; получение поверхностей с высокой капиллярностью для повышения износостойкости и сцепления с покрытиями и красками;

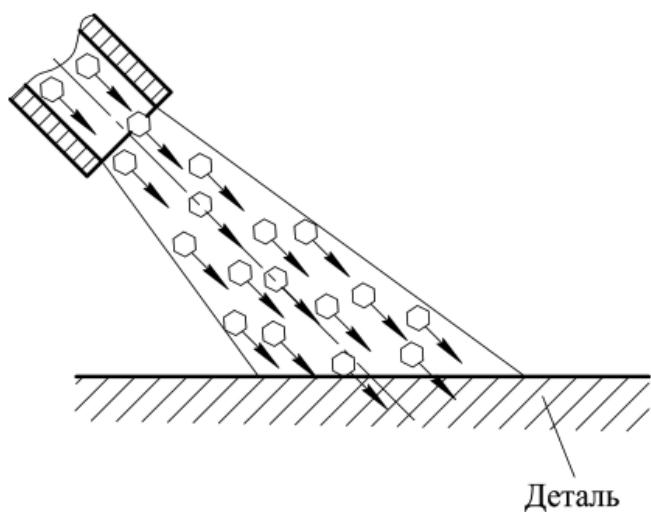


Рис. 1. Схема гидроабразивной обработки

увеличение стойкости инструмента устраниением следов механической обработки; удаление окалины, ржавчины и очистка поверхностей от загрязнения; снятие заусенцев и грата.

Схема процесса ГАО представлена на рис. 1.

Установки для ГАО, применяемые в настоящее время, имеют разнообразную конструкцию и различаются способами подачи суспензии к струйному аппарату и её ускорения.

Гидроабразивные установки по способу подачи суспензии к струйному аппарату и на обрабатываемую заготовку разделяются на установки:

с эжекцией суспензии в струйный аппарат и последующим ускорением её газом или водой;

с нагнетанием суспензии газом, водой или насосом с последующим истечением её через сопло;

с нагнетанием суспензии газом, водой или насосом и последующим ускорением её лопастями ротора, газом или водой [3].

Обязательным при разработке конструкции установки для ГАО является надёжная герметизация рабочей камеры для исключения выделения пыли при работе, что значительно улучшает условия труда (по сравнению с пескоструйной обработкой), а также позволяет располагать установки в общей линии станочного оборудования, что сокращает транспортные перемещения обрабатываемых заготовок.

Технологические параметры струйной ГАО зависят от свойств и характеристик абразивного материала. Производятся разнообразные шлифовальные материалы в зерне и порошках, которые отличаются строением материала, его прочностью, содержанием и характером примесей. При ГАО чаще всего применяют минеральные абразивные материалы, которые подразделяются на естественные (природные) и искусственные.

Несмотря на высокую производительность и преимущества по сравнению с другими методами обработки свободным абразивом, метод ГАО на сегодняшний день изучен недостаточно. Выполнено несколько работ, посвящённых изучению процесса ГАО, исследованию его основных закономерностей и технологических возможностей. Наибольший интерес в области изучения метода ГАО представляют работы, посвящённые изучению сущности метода ГАО [1, 4, 5]. В этих работах приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса на съём металла и шероховатость обработанной поверхности.

Анализируя имеющиеся результаты, полученные при ГАО, можно сделать вывод, что недостаточно полно описывается сам процесс обработки, полученные зависимости носят эмпирический характер или рассматривают частные вопросы. При проектировании технологических процессов

ГАО недостаточно изучено формирование шероховатости обработанной поверхности. Нет сведений по разработке рациональных технологических режимов применительно к процессу формирования параметров качества поверхности слоя деталей, слабо изучено влияние механических характеристик обрабатываемого материала.

Для разработки методики проектирования технологических процессов ГАО проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований процесса.

Проведён анализ влияния технологических параметров на скорость соударения частиц с поверхностью обрабатываемой детали. Используя известную зависимость гидродинамики, величину этой скорости можно представить в виде

$$v_q = K_L \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}}{\rho_{\text{см}}}},$$

где K_L – коэффициент потерь, учитывающий расстояние до поверхности обрабатываемой детали; $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление пульпы или воздуха; $\rho_{\text{см}}$ – плотность пульпы.

Коэффициент потерь K_L определяется экспериментально.

Подробно проанализировано формирование шероховатости обработанной поверхности. При этом одним из важнейших вопросов является теоретическое моделирование процесса единичного взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью детали.

Для построения модели единичного взаимодействия при ГАО использована методика, представленная в работе [4]. Рассмотрено косое соударение жёсткой частицы с деформируемым полупространством детали. При внедрении учитывалось только скольжение частицы по поверхности детали, исключая её возможное перекатывание.

Взаимодействие жёсткой частицы с деформируемым полупространством описывается системой уравнений

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h}{dt^2} = -F_N; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_\tau, \end{cases}$$

где m – масса частицы; h – глубина внедрения частицы; t – время; F_N, F_τ – нормальная и касательная составляющие силы, действующие на частицу среды только в течение времени взаимодействия.

Интегрирование уравнений проводилось в течение времени взаимодействия сферы с дефор-

мируемым полупространством, причём длительность контакта определялась из условия $dh/dt \geq 0$. Модель линейной зависимости сил контактного взаимодействия от глубины внедрения частицы в активной фазе соударения основывалась на гипотезе Н.М. Михина [6] о пластическом характере контакта.

Решение системы уравнений получено с начальными условиями: $h = 0$, $dh/dt = \pm v_q \sin \alpha$ при $t = 0$, где α – угол соударения; $h = h_{\max}$; $dh/dt = 0$ при $t = \tau$; τ – длительность контакта, в течение которого получены зависимости для определения максимальной глубины внедрения частицы и съёма металла за один удар абразивной частицы.

Решение системы уравнений с использованием теории пластического контакта сферического индентора с деформируемым полупространством позволило получить зависимости для определения максимальной глубины внедрения частицы и съёма металла за один удар абразивной частицы.

Максимальная глубина внедрения частицы при ГАО запишется в виде

$$h_{\max} = DK_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \rho_q}{3c\rho_{\text{см}} k_s \sigma_s}},$$

где D – диаметр частицы; ρ_q – плотность материала частицы; σ_s – предел текучести материала детали; c – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; α – средний угол соударения частиц с поверхностью детали.

Съём металла за один удар абразивной частицы определится по формуле

$$q = 1,9k_c D^3 \left(K_L \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \rho_q}{3c\rho_{\text{см}} k_s \sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} \times (ctg \alpha - f) \rho_d,$$

где f – коэффициент пропорциональности; k_c – коэффициент стружкообразования.

Для расчёта удаления металла предположим, что появление случайных точек взаимодействия на поверхности детали при ГАО (поток событий) подчиняется закону Пуассона.

Соответственно, зависимость для определения съёма металла при ГАО запишется в виде

$$Q = P_2 \lambda k_\alpha^Q t q \frac{S_{\text{дет}}}{eD^2},$$

где P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведёт к микрорезанию; k_α^Q – коэффициент, учитывающий угол падения струи; t – время обработки; $S_{\text{дет}}$ – площадь поверхности детали; λ – интенсивность потока.

Образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит многократным наложением и пересечением абразивных царапин, оставляемых абразивными частицами. В результате на поверхности детали образуется новый установившийся микрорельеф, параметры которого зависят от исходного профиля и определяются только технологическими режимами и размерами частиц. Для расчёта параметров шероховатости обработанной поверхности использована методика [7] для описания теоретико-вероятностного процесса формирования шероховатости поверхности детали при абразивной обработке.

Из практического опыта и геометрических соображений отношение ширины абразивных царапин к глубине запишется в виде

$$b_i \approx 3,8a_i.$$

Установлено, что небольшая доля частиц от их общего числа, которая участвует во взаимодействии, будет оставлять следы глубиной, близкой к h_{\max} . Функция распределения глубин внедрения частиц в обрабатываемую поверхность аппроксимируется степенной зависимостью

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k \text{ при } 0 \leq h_i \leq H_0,$$

где z_i – число лунок на уровне h_i от отпечатка наибольшей глубины h_{\max} ; z_0 – номинальное количество взаимодействующих частиц рабочей среды; H_0 – разность глубин следов; k – показатель распределения глубины царапин; $k \leq 3$.

За условную высоту неровностей обработанной поверхности H_{yc} принималось расстояние от средней линии, проведённой между вершинами неровностей в данном поперечном сечении детали, до уровня самых глубоких впадин, имеющихся на этой поверхности. Учитывая, что края царапин примерно равномерно смешаются вверх и вниз от средней линии, за глубину внедрения частиц в рассматриваемом поперечном сечении принималась глубина, отсчитанная от этой линии. Дальнейшие расчёты проведены на единице длины нормального сечения детали L_{ed} .

Величина H_{yc} определялась из условия

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} 3,8a_i = 3,8 \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = L_{ed},$$

где $z_{\text{сеч}}$ – количество частиц, оставивших след в результате обработки в данном нормальном сечении.

С учётом многократности актов соударения суммирование заменено интегрированием:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}} \right)^2 = k z_{\text{сеч}} \int_0^1 (1 - \psi) \psi^{k-1} d\psi.$$

В свою очередь,

$$\psi = \frac{H_0}{h_{\max}} \left(2 \frac{z_i}{z_0} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Интеграл представляет собой В-функцию. Выразив его через Г-функцию, после преобразований получим

$$H_{yc} = H_0 \sqrt{\frac{L_{ed}}{0,32 h_{\max} z_0}}.$$

При подстановке глубины h_{\max} в разность глубин H_0 получим

$$H_{yc} = 0,58 \sqrt{\frac{h_{\max} L_{ed}}{z_0}}.$$

Учитывая соотношение между H_{yc} и Ra для ГАО среднее арифметическое отклонение установившейся шероховатости обработанной поверхности запишется в виде

$$Ra = 0,09 \sqrt{\frac{h_{\max} L_{ed}}{z_0}}.$$

Так как z_0 – это количество зёрен, проходящих через единичную длину в единицу времени, а λ – число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки, то через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину в $\frac{L_{ed}}{2R}$ больше частиц:

$$H_{yc} = 0,84 \sqrt{\frac{h_{\max} R}{\sqrt{\lambda}}};$$

$$Ra = 0,13 k_{\alpha}^{Ra} \sqrt{\frac{h_{\max} R}{\sqrt{\lambda}}},$$

где k_{α}^{Ra} – коэффициент, учитывающий угол падения струи.

Определение времени обработки является одной из важнейших задач, без решения которой невозможно проектирование технологических процессов.

Определены зависимости для расчёта времени обработки, необходимого для удаления дефектного слоя:

$$t_{\Delta L} = \frac{eD^2 \Delta L}{\lambda P_2 V},$$

где ΔL – толщина дефектного слоя; достижения установившейся шероховатости

$$t_{Rayst} = \frac{k_{np} e Rz_{исх} D^2}{\lambda P_2 V},$$

где k_{np} – коэффициент, учитывающий вид профиля исходной шероховатости; $Rz_{исх}$ – исходная шероховатость поверхности;

изменения шероховатости поверхности

$$t = -\frac{ek_{np} Rz_{исх} D^2}{0,75 \lambda P_2 V} \ln \left(\frac{Ra^3 - Ra_{уст}}{Ra^u - Ra_{уст}} \right),$$

где Ra^u , Ra^3 , $Ra_{уст}$ – исходная, заданная и установившаяся шероховатость поверхности, соответственно;

удаления заусенцев и облоя

$$t_3 = k_{зас} \frac{eL_0^2 D}{\lambda P_2 V},$$

где L_0^2 – толщина заусенца у основания; $k_{зас}$ – коэффициент, учитывающий особое расположение заусенца на детали и специфические условия взаимодействия абразивной частицы с его поверхностью;

скругления острых кромок

$$t_r = k_r \frac{0,215 e D r^2}{\lambda P_2 V},$$

где k_r – коэффициент, учитывающий специфические условия взаимодействия абразивной частицы с кромкой детали; r^2 – радиус скругления острой кромки.

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности и съёма металла проведены комплексные экспериментальные исследования, которые подтвердили, что полученные модели можно использовать для формализации технологического проектирования процессов ГАО. Разработан банк эмпирических коэффициентов для различных условий обработки.

На рис. 2–10 представлены сравнения результатов теоретических и экспериментальных иссле-

дований. Сплошной линией показаны полученные теоретические зависимости, а точками – результаты экспериментов. Показаны доверительные интервалы.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика оптимизации процесса ГАО.

Для оптимизации технологических процессов ГАО в качестве целевой экономической функции выбрана производительность, т. е. из всего множества проектных решений выделяется такое, которое обеспечивает при определённом сочетании технологических факторов минимальное время обработки детали. При этом в качестве ограничительной функции будет использоваться заданная шероховатость поверхности либо необходимый радиус скругления острой кромки и т. п. Таким образом, при переборе и анализе вариантов принимается во внимание подмножество проектных решений, удовлетворяющих заданным техническим условиям.

Сложность процесса проектирования, многовариантность технологических решений, большая трудоёмкость определения оптимального варианта вызывают необходимость использования САПР ТП.

В качестве исходных данных, необходимых для начала расчёта, вводятся значения исходной и заданной шероховатости поверхности, марка материала, массивы размеров абразивных частиц, давления пульпы, углов обработки, расстояний от сопла до обрабатываемой поверхности, а также предел текучести и коэффициент упрочнения несущей поверхности.

После этого рассчитываются показатели процесса обработки (максимальная глубина внедрения абразивной частицы и шероховатость обработанной поверхности) для всех комбинаций исходных данных. В процессе вычисления из полученных вариантов выбираются те, для которых величина ограничительной функции меньше допускаемой, и для них рассчитывается время обработки.

На следующем этапе работы алгоритма из этих массивов выбирается минимальное время обработки и соответствующие ему режимы. Эта комбинация технологических параметров обработки считается оптимальной.

Предложенная методика оптимизации технологических параметров ГАО позволяет более полно учсть влияние механических характеристик материала детали на производительность и качество обработки.

В соответствии с разработанной методикой рассчитаны рациональные режимы для ГАО, позволяющие уменьшить время обработки на 20 %. Предложенные режимы обработки приняты

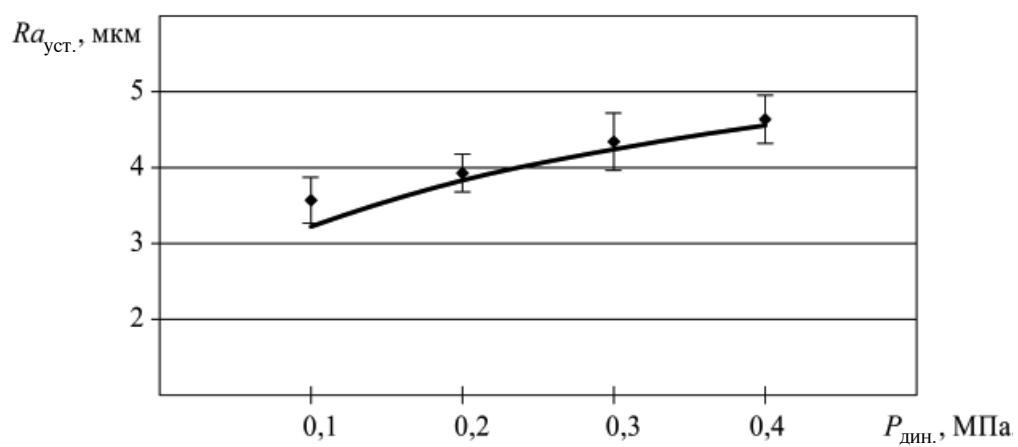


Рис. 2. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости установившейся шероховатости поверхности от давления струи (сталь 45)

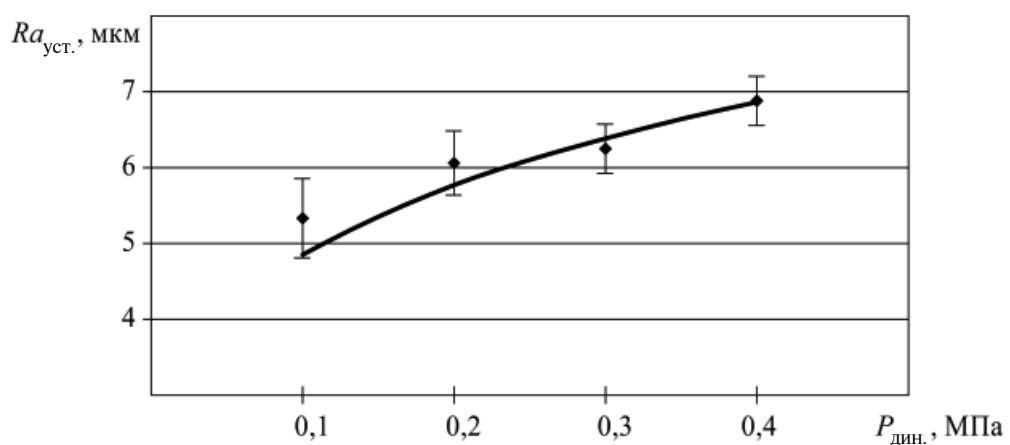


Рис. 3. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости установившейся шероховатости поверхности от давления струи (медь М06)

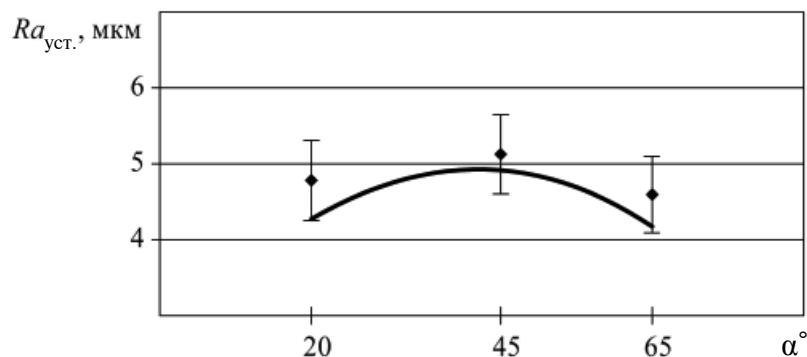


Рис. 4. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости установившейся шероховатости поверхности от угла обработки (латунь Lс59)

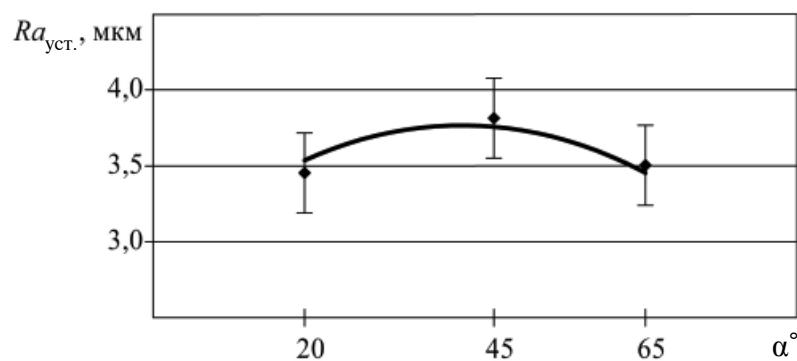


Рис. 5. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости установившейся шероховатости поверхности от угла обработки (сталь 45)

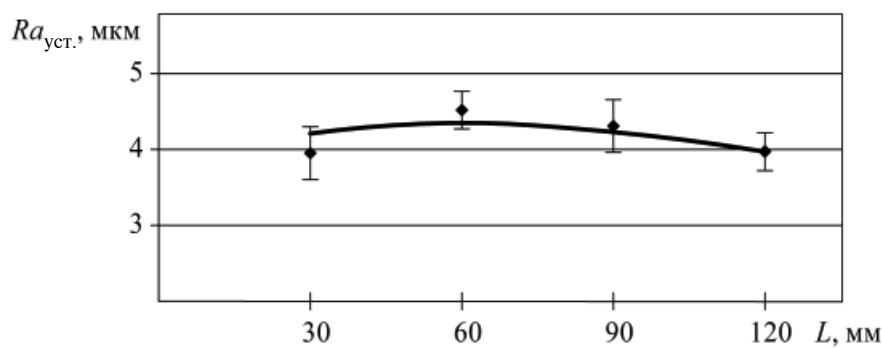


Рис. 6. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости установившейся шероховатости поверхности от расстояния до обрабатываемой поверхности (алюминий Д16)

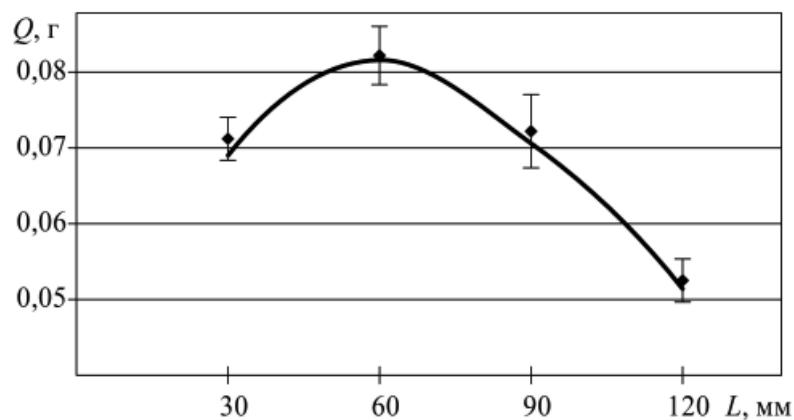


Рис. 7. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости съёма металла от расстояния до обрабатываемой поверхности (сталь 12Х18Н10Т)

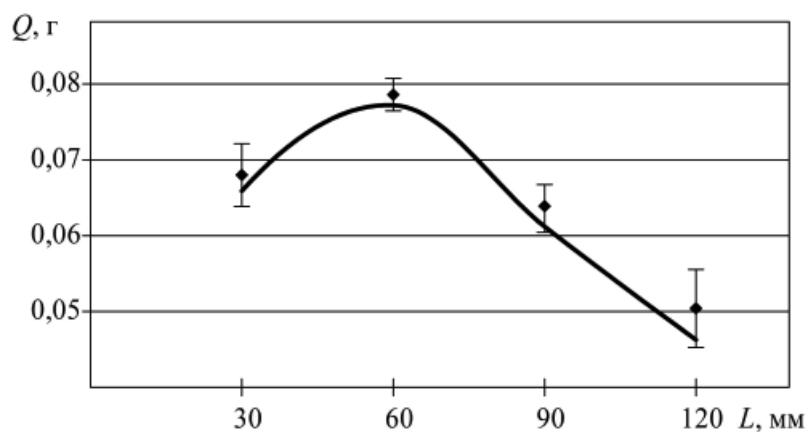


Рис. 8. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости съёма металла от расстояния до обрабатываемой поверхности (алюминий Д16)

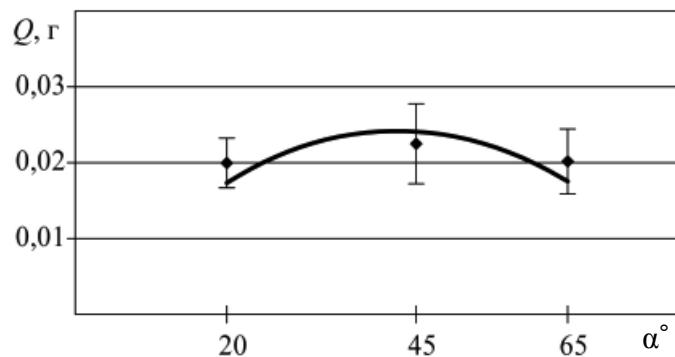


Рис. 9. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости съёма металла от угла обработки (латунь Лс59)

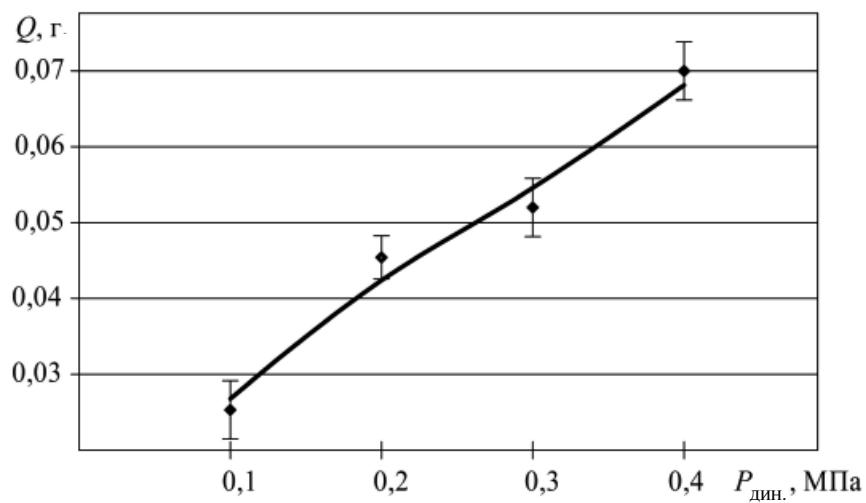


Рис. 10. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости съёма металла от давления струи (сталь 45)

ОАО «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону) для внедрения.

По результатам проведённых исследований сделаны следующие выводы:

разработана модель единичного взаимодействия частиц с поверхностью детали при ГАО, позволяющая определить съём металла за один удар абразивной частицы;

на основе модели процесса формирования шероховатости поверхности при ГАО деталей получены теоретические зависимости для расчёта величины установившейся шероховатости, учитывающие технологические параметры обработки и свойства материала детали. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных данных не превышает 20 %;

получены теоретические зависимости для расчёта величины съёма металла, а также времени обработки при ГАО. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных данных не превышает 20 %;

разработана методика оптимизации технологических процессов ГАО, позволяющая значительно расширить область применения исследуемого метода.

Библиографические ссылки

1. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1995. С. 144.
2. Рао Бакли. Связь между эрозионной стойкостью пластичных материалов при эрозии, вызванной твёрдыми частицами, и их свойствами // Тр. американского общества инженеров-механиков. Сер. Энергетические машины и установки. 1985. № 3. С. 83–96.
3. Кошелев А.А., Эйзнер Л.А. Технология и оборудование для автоматизированной гидроабразивной обработки деталей // Автоматизация технологических процессов в области машиностроения для животноводства и кормопроизводства. Ростов-на-Дону: НИИТМ, 1981. С. 37–47.
4. Непомнящий Е.А., Кремень З.И., Массарский М.Л. О закономерностях образования микрорельефа поверхности при обработке потоком абразивных частиц // Изв. вузов. Машиностроение. 1984. № 2. С. 117–121.
5. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Киев: Техника, 1989. С. 177.
6. Михин Н.М. Внешнее трение твёрдых тел. М.: Наука, 1977. С. 222.
7. Королёв А.В., Новосёлов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Т. 1, 2. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 526 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ В УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Е.И. Тавер

2012 г. Объем 368 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-666-6 Цена 600 р.



Качество товаров рассмотрено, с одной стороны, как важнейший результат производственной деятельности, а с другой — как особый объект управления. При этом состав, нормативные и физические значения показателей качества товара и факторов, от которых оно зависит, являются конечным объектом управления. Даны субъекты управления качеством, универсальные подходы к нему, измерения, оценки, подтверждение соответствия и контроль качества, правовые основы, стандарты и модели управления качеством. Исходя из этого, проведен анализ задач и методов управления качеством при маркетинге, проектировании, производстве и использовании товара, а также затрат на качество.

Допущено УМО по образованию в области прикладной математики и управления качеством в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 220501 – Управление качеством и направлению 221400 – Управление качеством.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Строгий пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 504.4.054

В.В. Кузина, доц., А.Н. Кошев, д-р хим. наук, проф.

(Пензенский государственный университет архитектуры и строительства)

kuzina@pguas.ru

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ НАД СОСТОЯНИЕМ ВОДНОЙ СРЕДЫ РЕГИОНА

Рассмотрены принципы построения автоматизированной системы управления и контроля над состоянием водной среды на примере Пензенского региона, которая позволяет рассчитать концентрацию загрязняющих веществ в выбранной точке водной системы региона в заданный момент времени. При этом для моделирования водного бассейна региона используется графическое представление системы в виде взвешенных направленных графов, а для расчёта распределения концентраций загрязняющих веществ – диффузионные и конвективные модели переноса вещества в совокупности с математической постановкой физико-химических и технологических задач, моделирующих возможные техногенные ситуации.

Ключевые слова: автоматизированная система, математическая модель, ориентированный граф, векторный редактор, концентрация вещества, прогнозирование распространения вещества.

Designing principles of the automatic control and management system over a water environment condition as an example of the Penza region, which allows to calculate of the polluting substances concentration in the region water system selected point in the specified time moment are considered. In such a case system graphic representation in the form of the weighed, directed graphs are used for the region water basin modeling. Diffusive and convective models of substance transfer in the aggregate with mathematical statement of the physicochemical and technological tasks modeling possible anthropogenic situations is used for calculation of the polluting substances concentration distribution.

Key words: the automated system, the mathematical model, the directed graph, the vector editor, substance concentration, prediction, substance spreading.

Эффективным средством при изучении экосистем в динамике являются методы математического моделирования, позволяющие совершенствовать процессы сбора и хранения исходной информации. Использование автоматизированных систем управления и контроля (АСУиК) позволяет получить промежуточные результаты на любом этапе, представляющем интерес для исследователя.

Предметом научного интереса является прогнозирование возможного распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в водной системе региона.

Цель работы – построение информационной системы для определения зависимости концентрации сбрасываемых ЗВ от расстояния до источника загрязнителя в определённый момент времени мониторинга.

АСУиК должна обеспечить хранение и обработку параметров связанных между собой водных ресурсов и прилегающей местности. Водная система области, представляющая совокупность малых рек, озёр, болот и других водоёмов, с помощью наземных течений или подземных вод замыкается в единый цикл и может быть formalизована для построения её математической модели.

Эффективным средством изображения и исследования различного рода водных систем являются графы как мощный класс объектов, относящихся к графическим представлениям.

Исходя из целей поставленной задачи, разработаны принципы создания АСУиК, включающей базы данных определённой структуры, отражающей специфику водной системы региона, реализацию алгоритмов мониторинга на графах, позволяющих предоставлять и обрабатывать информацию об объектах и их связях, интерфейсы входной и выходной информации.

Построен ориентированный граф (орграф), представляющий схематическое изображение водной системы области. В качестве конечных множеств, задающих граф, выбраны множество вершин – характерные точки местности, в которых может произойти сброс ЗВ в водную систему, а также места водозабора и контрольные точки, роль которых могут выполнять места отдыха, населённые пункты, а также места изменения параметров (характеристик) водоёмов – рельеф, течение и т. д.

Множество рёбер (дуг орграфа) – однородные участки местности: применительно к рекам это означает, что параметры исследуемого отрезка

(скорость течения, форма рельефа или коэффициент диффузии ЗВ) должны быть приблизительно одинаковы во всех точках объекта.

Основными функциями АСУиК являются: ввод исходных данных, в качестве которых принимается ориентированный граф водной системы региона с указанием весов дуг и вершин;

истоки, стоки и контрольные точки, в которых расположены средства измерения и контроля; начальные значения концентраций ЗВ;

анализ всех путей ориентированного графа от истоков к стокам через контрольные точки;

определение значений концентраций вещества в зависимости от технологической ситуации возникновения загрязнения, времени и расстояния от исходной точки;

анализ расчётных значений концентраций, сравнение их с предельно допустимыми концентрациями (ПДК);

принятие организационных решений по предотвращению обострения экологической ситуации.

Задачи мониторинга предъявляют определённые требования к построению графа водной системы местности. Поскольку дуги орграфа представляют собой однородные участки местности, то при изучении ситуации в области, моделируемой соответствующей дугой, применяется определённая математическая модель, отражающая возникшую экологическую ситуацию. В случаях, когда требуется исследовать территорию, моделируемую участками графа с различными параметрами, необходимо последовательно рассмотреть все эти участки. При этом исходными данными на каждом последующем этапе исследований будут результаты расчётов, полученных на пройденных участках графа. Такие ситуации могут возникать в точках местности, в которых две или более рек впадают в одну; одна река разливается на две и более; резко изменяется состав грунта, рельеф дна, а следовательно, и скорость течения реки.

Алгоритм решения реализуется по следующей схеме.

1. Составляется орграф исследуемой территории по правилам, описанным выше.

2. Обозначается исток.

3. Отмечаются все дуги, исходящие из выбранных вершин.

4. Применяются модели расчёта распределения ЗВ к отмеченным дугам, т. е. определяется зависимость концентрации от расстояния и времени $C(x, t)$. По этой функции рассчитывается значение $C_0(t) = C(L, t)$ в конце каждой отмеченной дуги (на расстоянии, равном длине дуги). Эти данные будут исходными для последующих дуг, смежных с отмеченными.

5. Снимаются метки с вершин, а метки дуг изменяются.

6. Для каждой вершины, в которую входят только вновь отмеченные дуги, записываются значения $C_0(t)$, полученные на четвёртом шаге, и отмечаются вершины. Если в вершину входит несколько дуг, то определяется суммарное значение $C_0(t)$. Полученное значение $C_0(t)$ конкретной вершины будет исходным для дуг, выходящих из данной вершины.

7. Снимаются метки с дуг, входящих в отмеченные вершины.

8. Если сток не попал во множество отмеченных вершин, то переход к п. 3, иначе – к п. 9.

9. Получены и графически представлены исключимые функции зависимости концентрации от расстояния и времени $C_i(x, t)$ для всех дуг графа.

Рассмотрим возможные экологические и техногенные ситуации, которые учитывались при построении математических моделей.

Разрабатывались модели по трём основным вариантам массопереноса ЗВ: диффузии; одновременной конвекции и диффузии; преимущественно конвекции. В каждом случае рассматривались одномерные, двумерные или трёхмерные математические модели [1–5].

В условиях одномерной диффузии, когда ЗВ переносятся в одном преобладающем направлении трёхмерного пространства, возможны два варианта:

1. Имеется некоторый точечный источник с заданным известным количеством ЗВ (негерметичный бак, ящик или контейнер с ЗВ, попавший в водоём). При этом рассматривались два случая распространения ЗВ, когда:

концентрацию можно считать постоянной в течение длительного времени;

концентрация ЗВ в источнике убывает со временем.

2. Источник является «постоянно действующим», распространяющим в некоторой точке водоёма известное количество ЗВ в каждый момент времени (так называемая «загрязняющая труба»).

Задача двумерной диффузии решалась для случая, когда постоянно действующий источник загрязнения с плотностью $p(x, t)$ действует на некотором, достаточно малом участке границы водоёма. Считается, что перепады концентрации ЗВ на глубине водоёма незначительны, и основной процесс диффузии происходит по длине и ширине.

Задача трёхмерной сферической диффузии в однородной среде рассматривалась для следующих случаев: в начале координат (в глубине водоёма) действует источник загрязнения постоянной мощности, выделяющий в единицу времени некоторое количество ЗВ, а в окружающем пространстве начальная концентрация постоянна; в водоём попадает фиксированное (ограниченное) количество ЗВ.

Частным является случай, когда источник ЗВ находится на поверхности или на дне водоёма, и диффузия в атмосферу и в донный грунт не происходит.

Конвективно-диффузионный перенос рассмотрен на примере источника пассивной примеси в виде двумерного канала (например, для сброса промышленных стоков), действующего на некотором малом отрезке границы водоёма. Возможны два случая попадания ЗВ в водоём: ЗВ медленно вытекает через границу, и начальную концентрацию можно считать постоянной; под давлением ЗВ вытесняется в канал с постоянной скоростью.

Конвективный механизм возможен, когда ЗВ будут поступать в течение некоторого времени, в результате чего может образоваться равномерно движущийся поток, а также когда загрязнение происходит в движущемся потоке.

Математические модели, используемые в информационной системе, представляют собой уравнения математической физики, описывающие процессы диффузионного, диффузионно-конвективного и конвективного массопереноса. Начальные и граничные условия для реализации каждой модели подобраны в соответствии с технологической ситуацией и постановкой задачи. Использованы известные методы решения, основанные на интегральных преобразованиях с использованием интегралов Пуассона, а также конечно-разностных схем [6–9].

После разработки необходимых математических моделей и расчётных программ можно сформировать взвешенный ориентированный граф, упорядоченный по дугам от истока к стоку, который далее анализируется и обрабатывается в зависимости от поставленной задачи. Так, например, задачи определения максимальной концентрации и времени достижения максимальной и предельно допустимой концентрации в вершине графа, являющейся стоком, сводятся к расчёту максимального потока в полученном орграфе и поиску минимального маршрута.

АСУиК разрабатывается с использованием объектно-ориентированного языка Java 6. Выбор в пользу данного языка сделан в связи с тем, что написанные программы не зависят от операционной системы.

В качестве среды разработки использована NetBeans IDE 7.0, графическая среда разработки от компании Oracle, в которой имеется достаточное количество инструментов, позволяющих проектировать сложный графический интерфейс информационной системы.

Основой графического представления АСУиК является редактор графов (рис. 1).

В левой части окна представлен участок карты, размер которой задаётся в соответствующем поле справа (в пикселях). Также можно задавать масштаб карты для удобства построения графа. Чтобы задать орграф, необходимо в области

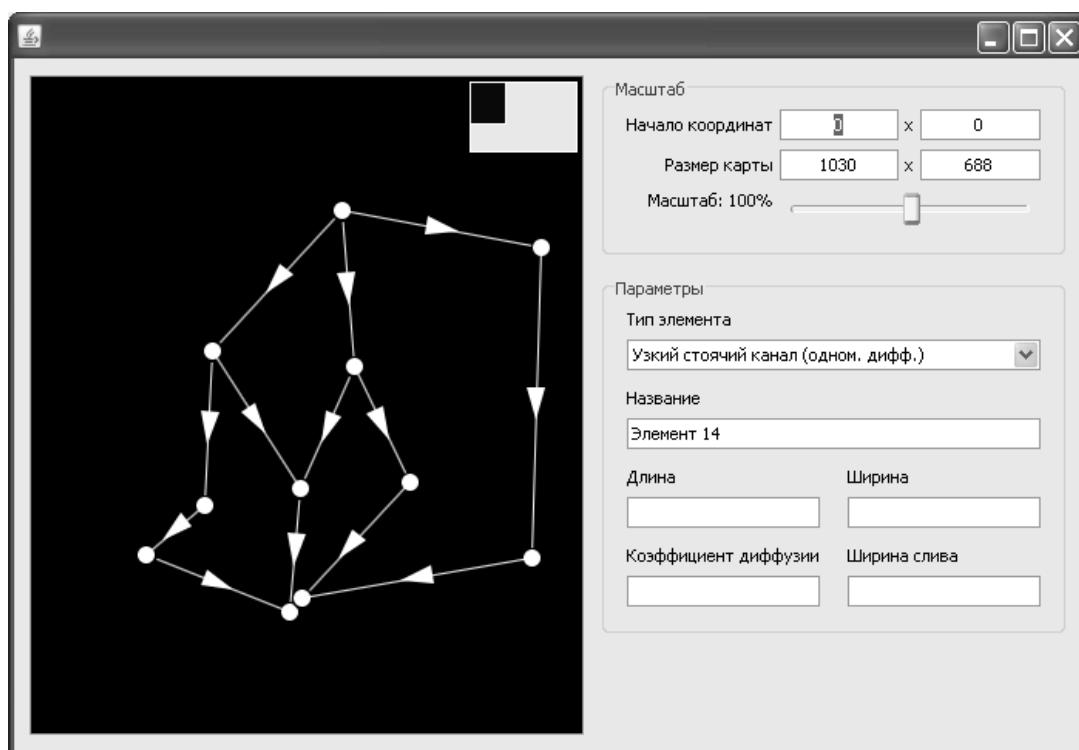


Рис. 1. Редактор графов

«Параметры» ввести характеристики каждой дуги: тип модели, название дуги, ширину водоёма (для двумерных моделей), коэффициент диффузии и ширину слива. Длина дуги рассчитывается автоматически в зависимости от выбранного масштаба.

При двойном щелчке по дуге орграфа открывается окно, представляющее различные графики в зависимости от типа модели. На рис. 2 представлена общая экранная форма для одномерных моделей.

Левый график представляет зависимость $C(t)$ в фиксированной точке пространства, правый – зависимость $C(x)$ в определённый момент времени. Нажатием левой кнопкой мыши на области графиков можно изменять значение времени t или x , перемещая вертикальную полоску. Изменение этих значений будет отображаться в соответствующих полях, расположенных над графиками. Горизонтальная полоска показывает уровень ПДК.

Рис. 3 иллюстрирует двумерную диффузию вещества. На графике двумерной диффузии концентрация изображается с использованием цветовой гаммы. Цветовая шкала показана справа от графика. Под цветовой шкалой можно задавать точность отображения в квадратных метрах. С увеличением каждого из значений произведения уменьшается точность воспроизведения графика. При нажатии на кнопку «Авто» можно увидеть изменение концентрации во времени (ползунок снизу – индикатор изменения времени). Для остановки ролика следует нажать на клавишу «Авто» повторно. Передвинув ползунок на нужную позицию времени и нажав на кнопку «Обновить», пользователь может увидеть график концентрации в заданный момент времени. При установке курсора на экране можно прочитать значение концентрации ЗВ непосредственно в данной точке (оно отображается рядом со стрелкой мыши).

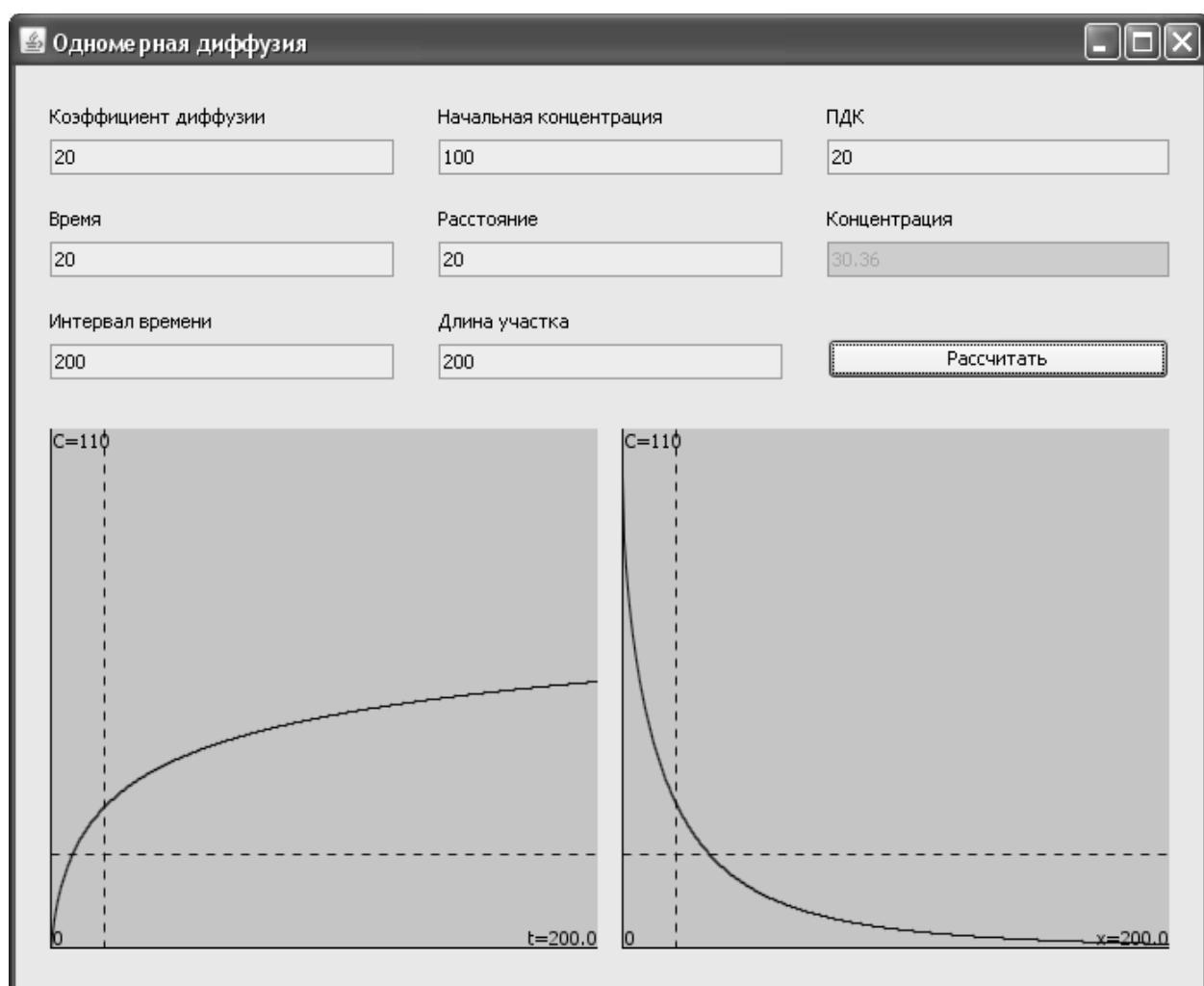


Рис. 2. Экранная форма, иллюстрирующая одномерную диффузию

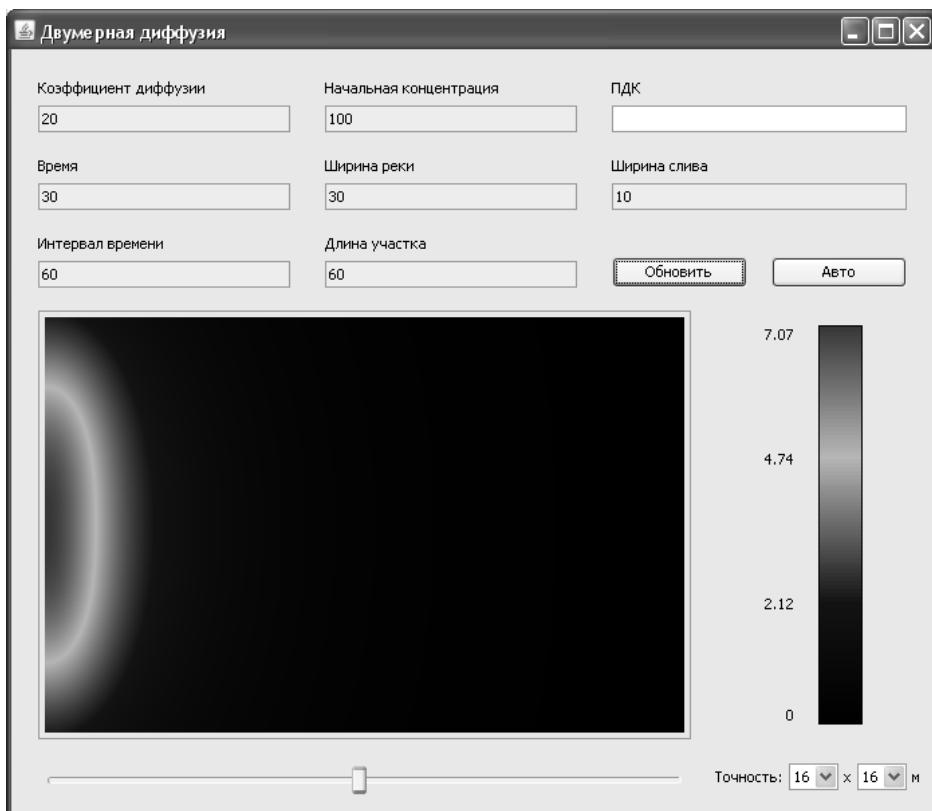


Рис. 3. Экранная форма, иллюстрирующая двумерную диффузию

Представленная структура АСУиК имеет понятный интерфейс, при её использовании не требуется особых знаний в области информационных технологий. АСУиК может представлять интерес для экологов, а также для строителей на этапе проектирования объектов различного назначения для прогнозирования ситуаций техногенного характера.

Библиографические ссылки

1. Кузина В.В., Кошев А.Н. Система мониторинга распространения возможных техногенных загрязнений водной среды региона на основе математических моделей и методов // Известия вузов. Строительство. 2008. № 7. С. 106–112.
2. Кузина В.В., Кошев А.Н., Сухов И.Ф. Математическое моделирование и построение информационной системы для мониторинга распространения возможных техногенных загрязнений водной среды региона // Известия вузов. Строительство. 2008. № 8. С. 70–75.
3. Кузина В.В., Кошев А.Н. Моделирование и прогнозирование техногенных загрязнений водной среды

региона // Сб. науч. тр. Хмельницкого национального ун-та. 2008. № 1. С. 132–135.

4. Кузина В.В., Кошев А.Н. Математическое моделирование процессов переноса примесей в водных экосистемах региона // Сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. Т. 4. Секция 4 [под общ. ред. В.С. Балакирева] Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 2010. С. 88–91.

5. Кошев А.Н., Кузина В.В., Глебова Т.А. Математическое моделирование как элемент управления в задачах строительной отрасли // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 2 (13). С. 167–176.

6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 3-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1966. 724 с.

7. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1972. 688 с.

8. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 320 с.

9. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2003. 230 с.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присыпаемых для публикации, можно найти на сайте www.mashin.ru