

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 58

АПРЕЛЬ 2015

№ 4

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЧАСТЬ IV

Под редакцией доктора технических наук, профессора В. А. Валетова

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	249
Валетов В. А. Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств.....	250
ЧПУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования.....	268
КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА	
Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки.....	273
Юльметова О. С., Третьяков С. Д., Валетов В. А., Щербак А. Г. Разработка методик определения влияния шероховатости на функциональные свойства узлов гиросприборов.....	278
Любимый А. В., Исаев Р. М. Исследование влияния микрогеометрии поверхности деталей на функциональные свойства изделия.....	283
Любимый А. В., Исаев Р. М. Исследование возможностей улучшения функциональных свойств тормозных муфт.....	286
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ	
Падун Б. С., Киприянов К. В., Шеманаев А. С. Метод синтеза технологических процессов изготовления изделий.....	289
Васильев Н. С., Помпеев К. П., Тимофеева О. С. Оптимизация параметров обработки микрофрезерованием с использованием САМ-системы VERICUT.....	294
Красильников А. В. Математическое описание работы гидродинамического стенда с системой поддержания давления, содержащей разгруженный клапан.....	297
Валетов В. А., Шмигельский И. Ю. Конструктивно-технологические особенности стенда имитации фоноцелевой обстановки.....	304

Валетов В. А., Юльметова О. С., Щербак А. Г. Применение пучковых технологий при изготовлении узлов гироскопических приборов	308
Шмигельский И. Ю. Анализ индикатрис спектральных коэффициентов яркости поверхностей с различной микрогеометрией	312
Исаев Р. М., Любимый А. В. Способы определения сил резания, возникающих в процессе обработки заготовок.....	315
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	
Шестаков В. С. Оптимизация производительности визуальной составляющей САПР планировки производства	318
Казанцев М. С. Метод оценки трудоемкости разработки управляющих программ для изготовления группы деталей на станках с ЧПУ	322
Путинцева А. А., Филиппов А. Н. Создание агента-вычислителя в многоагентной системе технологического назначения	325
Шестаков В. С., Сагидуллин А. С. Применение технологии websocket в web-приложениях технологического назначения	328

THEMATIC ISSUE

ACTUAL PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL PREPROCESSING

PART IV

Edited by V. A. Valetov, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE	249
Valetov V. A. Problems of Optimization of Workpiece Surface Microgeometry to Ensure Specific Functional Properties	250
PROGRAMMED NUMERICAL CONTROL OVER MANUFACTURING EQUIPMENT	
Afanasiev M. Ya., Gribovsky A. A. Concept of Adaptive Platform of Technological Equipment	268
SURFACE QUALITY AND FUNCTIONAL PROPERTIES	
Kuzmin Yu. P., Pompeev K. P., Tselishchev A. A. Application of Milling Machine to Impression a Regular Microrelief on Preform Surface.....	273
Yulmetova O. S., Tretyakov S. D., Valetov V. A., Scherbak A. G. Development of Methods for Estimation the Effect of Roughness on Functional Properties of Gyroscope Components.....	278
Lubiviy A. V., Isaev R. M. Investigation of the Effect of Component Surface Microgeometry on Functional Properties of Products.....	283
Lubiviy A. V., Isaev R. M. Investigation of Possibilities to Improve Functional Properties of Brake Coupling.....	286
TECHNOLOGIES OF PRODUCT MANUFACTURING	
Padun B. S., Kipriyanov K. V., Shemanaev A. S. Method for Synthesis of Technological Processes of Product Manufacturing	289
Vasiliev N. S., Pompeev K. P., Timofeeva O. S. Optimization of Micro Milling Process Parameters with the Use of CAM-System VERICUT	294
Krasilnikov A. V. Mathematical Description of Operation of Hydrodynamic Test Bench with Pressure Maintenance System Incorporating an Unloaded Valve.....	297
Valetov V. A., Shmigelsky I. Yu. Design and Technological Specifications of Target Environment Imitation Stand	304
Valetov V. A., Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Application of Beam Technologies to Gyroscopic Instrument Manufacturing.....	308
Shmigelsky I. Yu. Analysis of Indicatrices of the Spectral Brightness Coefficient for Surfaces with Different Microgeometry.....	312
Isaev R. M., Lubiviy A. V. Methods of Determining the Cutting Forces Arising in the Act of Workpiece Processing.....	315

ORGANIZATION OF PRODUCTION

Shestakov V. S. Optimizing Performance of Visualization Component of System of Automated Design of Industrial Layouts	318
Kazantcev M. S. Method for Evaluation of Time Expenditures of Numerical Control Program Development for a Workpiece Set Production Using a CAM System	322
Putintseva A. A., Filippov A. N. Creation of Calculating Agent in Multi-Agent System of Technological Destination	325
Shestakov V. S., Sagidullin A. S. Using Websocket Technology in Web-Applications of Technological Destination	328

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технологическая подготовка производства (ТПП) включает все виды работ, которые необходимо выполнить до начала выпуска любой продукции. Разнообразие этой продукции, особенно приборостроительной, трудно даже представить, поэтому в сфере ТПП работает огромное количество различных специалистов. Важность технологической подготовки производства трудно переоценить, поэтому любые работы, направленные на ее совершенствование всегда актуальны. Все аспекты ТПП лежат в сфере учебных и научных интересов кафедры технологии приборостроения. Научные исследования выполняют не только преподаватели, но и выпускники кафедры, и аспиранты, и студенты. Результаты некоторых исследований представлены в этом сборнике.

*Профессор кафедры технологии приборостроения
Университета ИТМО
доктор технических наук, В. А. ВАЛЕТОВ*

PREFACE

Technological preparation of production (TPP) includes all kinds of works that must be done prior to release of any product. The variety of these products, especially the instrumentation products, is difficult to imagine, and that is why TPP in instrumentation industry involves a large number of specialists. The importance of technological preparation of production is difficult to overestimate, so activity of any kind aimed at improvement of the TPP quality, is always relevant. The Department of Instrumentation Technology deals with all aspects of TPP related to instrument making. The scientific investigations carried out at the Department involve not only lecturers, but also the department graduates, post-graduate and undergraduate students. The results of some of the studies are presented in this collection.

*Doctor of Technical Sciences, Professor V. VALETOV
Department of Instrumentation Technology,
ITMO University*

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ КОНКРЕТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

В. А. ВАЛЕТОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: valetov.v@mail.ru*

Обоснована целесообразность оптимизации микрогеометрии поверхностей для обеспечения их конкретных функциональных свойств, приведены условия выполнения этой оптимизации. Представлены методы решения основных задач реальной оптимизации, позволяющей существенно улучшить качество изготавливаемой продукции. На конкретных примерах показана практическая невозможность оптимизации микрогеометрии на базе параметрических критериев ее оценки и контроля, обусловленная необходимостью использования большого количества параметров для точного описания каждой обрабатываемой поверхности, без которого найденную каким-либо образом наилучшую из возможных микрогеометрию невозможно повторить на серийной продукции. Разработана методика поиска оптимальной, а практически — наилучшей из возможных, микрогеометрии для конкретного свойства поверхности. Приведены также методики технологического обеспечения найденной наилучшей микрогеометрии и быстрого, надежного и малозатратного контроля реализованной микрогеометрии обработанной поверхности в изготовленной детали. Для контроля микрогеометрии с помощью графических критериев разработаны программы с использованием профилей и микро топографий поверхностей, которые зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ. Разработана методика фильтрации первичной информации с помощью амплитудного спектра, или методика определения базовой длины профилей при использовании графических критериев. Приведены примеры практического использования разработанных методик и программ и продемонстрирована их эффективность.

***Ключевые слова:** точное описание микрогеометрии, нормирование микрогеометрии, технологическое обеспечение оптимальной микрогеометрии, контроль полученной микрогеометрии, графические критерии оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей.*

Введение. Повышение качества выпускаемой продукции является важнейшей задачей промышленности, особенно актуальной для приборо- и машиностроения.

Общепризнанно, что работу любого изделия в основном определяют точность размеров, формы и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей деталей, а также состояние их поверхностного слоя. Влияние геометрических характеристик, свойств конструкционных материалов и их химического состава, а также многих других факторов в определенной степени изучено. Например, известно, что качество изделий существенно зависит от материалов, из которых они сделаны. Природные конструкционные материалы давно найдены, исследованы и успешно используются по назначению. Трудно предположить, что на Земле обнаружат новый материал, сопоставимый по количеству с железом и превосходящий его по качеству. Многочисленные искусственные материалы, как правило, значительно дороже естественных

(природных). Также давно установлено, что качество изделий сильно зависит от геометрической точности их изготовления и сборки. В мировой практике возможности повышения качества изделий за счет увеличения этой точности почти исчерпаны и связаны со значительным ростом затрат (рис. 1).

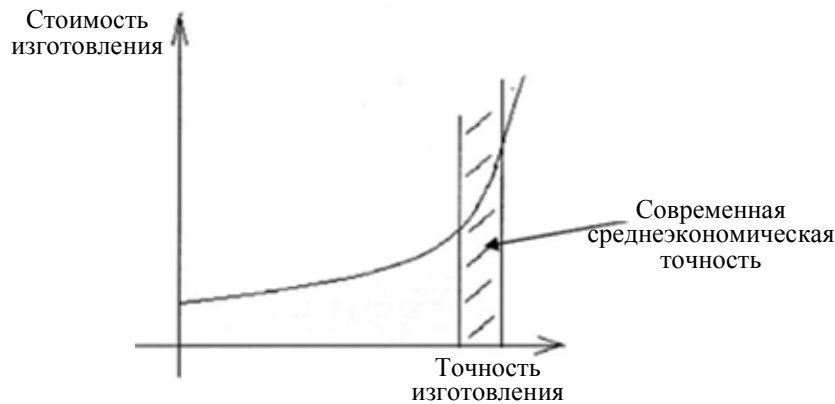


Рис. 1

Наименее исследованными остаются проблемы, связанные с оптимизацией микрогеометрии поверхностей и обеспечением простого, надежного и дешевого ее контроля, например [1—3], поэтому создание оптимального микрорельефа функциональных поверхностей деталей наряду с улучшением других характеристик поверхностного слоя, относится к наиболее эффективному резерву значительного повышения качества изделий.

Отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии поверхностей направлены в основном на решение задач с помощью параметрического описания профиля или поверхности. Большая часть исследований базируется на стандартных критериях, которые определяют лишь отдельные характеристики отклонений реальных поверхностей от идеальных [4—17].

В большинстве стран мира стандарты на микрогеометрию поверхности деталей построены на использовании профилей поверхностей, т.е. сечений поверхности плоскостью, при ее оценке и контроле. Для этих целей применяются приборы так называемого ощупывающего типа, оснащенные в основном индукционными датчиками. Многочисленные семейства этих приборов различаются габаритами, количеством вычисляемых параметров, стоимостью и т.п., но все они работают по принципу „ощупывания“ контролируемой поверхности алмазной иглой индукционного датчик. При протаскивании по поверхности игла повторяет выступы и впадины последней. Полученный таким образом профиль обрабатывается по соответствующей программе, в результате чего определяются значения различных параметров профиля и некоторые результаты его статистической обработки в графическом изображении. В последнее время появляется все больше так называемых бесконтактных приборов, позволяющих фиксировать микро топографию поверхности, но эти приборы вычисляют те же параметры, только относящиеся не к профилю, а к микро топографии поверхности.

Как известно, реальное решение задачи оптимизации микрогеометрии (т.е. нахождения наилучшей из возможных) требует выполнения следующих условий:

- оптимальную для конкретного функционального свойства микрогеометрию поверхности нужно знать, точно описать и нормировать, т.е. задать при изготовлении изделия;
- заданную оптимальную микрогеометрию нужно технологически обеспечить, т.е. знать, как ее реализовать;
- полученную микрогеометрию на обработанной поверхности нужно быстро, надежно и без лишних затрат проконтролировать.

Оптимизация микрогеометрии для конкретного функционального свойства поверхности и ее нормирование. Как известно, в 1975 г. в СССР был введен в действие ГОСТ

2789-73 на шероховатость поверхностей деталей [18] и сразу проявилась его полная метрологическая необеспеченность, которая, в несколько меньшей степени, сохранилась до сих пор. Однако не в этом состоит главная проблема параметрических стандартов: в большинстве стран введение аналогичных стандартов сопровождалось полным метрологическим обеспечением, но результат тот же — практическая невозможность оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для их конкретных функциональных свойств.

Использование существующих параметрических стандартов делает практически невыполнимым точное описание и нормирование найденной любым способом оптимальной микрогеометрии, т.к. для точного описания профиля поверхности требуется от трех (в простейшем случае) до двадцати пяти параметров. Непригодность этих стандартов для оптимизации микрогеометрии наглядно демонстрирует следующий рис. 2, где приведены профили двух зеркально противоположных поверхностей.

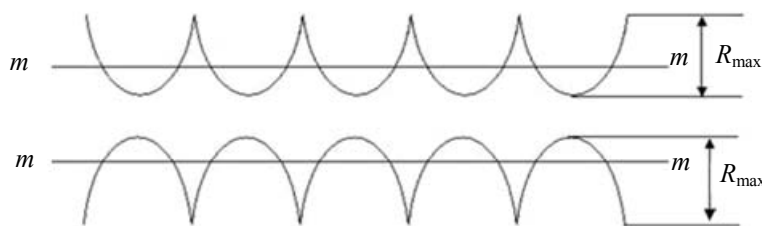


Рис. 2

Все используемые параметры микрогеометрии, например R_a и R_z , для этих профилей абсолютно одинаковы, а различие функциональных свойств, зависящих от микрогеометрии, для таких поверхностей не требует доказательств. Параметры R_a и R_z характеризуют всего лишь степень „гладкости“ поверхности, чего явно недостаточно для большинства ее функциональных свойств.

Следует подчеркнуть условность в данном случае термина „оптимизация“ микрогеометрии. В действительности речь может идти только о нахождении лучшей микрогеометрии из возможных в условиях конкретного производства. Тем не менее расточительно пренебрегать возможностью и такой „оптимизацией“. Существенное влияние микрогеометрии на два десятка функциональных свойств поверхностей доказано [19], но даже для доказанных случаев при использовании существующих параметрических стандартов процесс оптимизации микрогеометрии практически нереализуем.

В 1970-х гг. был предложен новый метод оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей, названный непараметрическим (графическим). В многочисленных публикациях рассмотрены все необходимые для практического использования аспекты этого метода [1—3, 20—36]. Нам неизвестны какие-либо опубликованные доказательства неприемлемости предложенного метода или отрицательный отзыв на эти работы, поэтому о причинах „прохладного“ отношения к методу можно только догадываться.

Так как в немногочисленных пока случаях практического применения непараметрического подхода к оценке и контролю характеристик поверхностного слоя деталей (не только микрогеометрии, см. [35]) получены положительные результаты, считаем целесообразным кратко изложить суть этого метода применительно к оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей приборов и машин. В качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей используются графические изображения различных функций. В менее ответственных случаях это могут быть графики опорных кривых (кривых Аббота) и функций распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей или микротопографий, а для более точной оценки и контроля — графики плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей или микротопографий. При создании программ распознавания графических изображений в качестве критериев лучше использовать графики самих профилей и

в пределе — графические изображения микро топографии поверхностей. Последнее практически означает возврат к комплексной оценке, характерной для ранее используемых образцов шероховатости, но с исключением субъективизма оценки, поскольку все операции предполагают полную компьютеризацию процесса.

Для улучшения какого-либо функционального свойства поверхности за счет ее микрогеометрии вначале нужно убедиться, влияет ли микрогеометрия на это свойство. С этой целью изготовим три образца, ничем, кроме микрогеометрии, не различающиеся (образцы можно отжечь, чтобы исключить возможное влияние наклепа на это свойство). Подвергнем испытаниям эти образцы в максимально одинаковых условиях с замером интересующего нас свойства. Если результаты будут практически одинаковы, то микрогеометрия поверхности не влияет на это свойство, и ее не нужно нормировать и контролировать. При различиях в результатах испытаний нужно искать лучшую из возможных микрогеометрию, обеспечивающую максимальную величину этого свойства. График соответствующей функции профиля или микро топографии для лучшего образца принимается за эталон для заданного функционального свойства поверхности.

Очевидно, что если какой-либо фактор оказывает существенное влияние на эксплуатационное свойство изделия, это влияние нужно оптимизировать и нормировать в технической документации на серийную продукцию. Традиционно нормируются марки материалов и особые их качества, компоненты геометрической точности и т.д.; в соответствии с ГОСТ 2789-73 нормируется и микрогеометрия поверхностей деталей, а точнее — параметры шероховатости, чаще всего Ra или Rz . Нецелесообразность такого нормирования связана с тем, что какой-либо параметр не может предопределять какое-либо свойство поверхности, да и не исключено многообразие профилей поверхности при конкретном значении любого параметра (см. рис. 2). Все параметры по ГОСТ, включая tp на средней линии, одинаковы, поэтому при точном обеспечении нормированного параметра невозможно предсказать, какой микрорельеф будет получен.

Доказано (см., например, [34, 36]), что для оптимизации микрогеометрии поверхности для конкретного функционального свойства требуется выполнение определенных условий. При использовании параметрических стандартов точно описать и нормировать оптимальную микрогеометрию практически невозможно из-за необходимости использования большого количества параметров и их технологического обеспечения. Пренебрегать реальной оптимизацией микрогеометрии поверхностей для их конкретных свойств убыточно, поскольку только за счет нее возможно многократно улучшить качественные показатели выпускаемой продукции. Нерационально и нормировать, обеспечивать и контролировать микрогеометрию поверхности в тех случаях, когда ее влияние несущественно или не известно.

Исходя из сказанного предлагается:

— нормировать не параметры, а свойства поверхности, существенно зависящие от ее микрогеометрии;

— каждому функциональному свойству, существенное влияние которого на микрогеометрию доказано, присвоить постоянный номер и проставлять его на стандартизованном знаке вместо незначущего параметра;

— с целью контроля серийной продукции на каждом предприятии для необходимых свойств поверхностей экспериментально построить эталоны в виде графиков вышеназванных функций или, при наличии соответствующего программного продукта, графических изображений эталонного профиля, а лучше — эталонной микро топографии поверхности (рис. 3, здесь Y_i — ордината профиля; W — вероятность появления этой ординаты; заштрихованная площадь — поле допуска эталона). Величина допуска, а также графическое

изображение кривой в качестве эталона будет зависеть, например, от степени важности этого свойства.

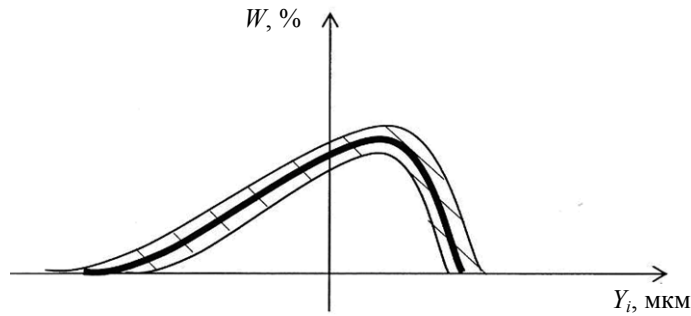


Рис. 3

Технологическое обеспечение оптимальной микрогеометрии функциональных поверхностей. Сначала приведем примеры технологической управляемости предложенных графических критериев оценки и контроля микрогеометрии. Для этого покажем, что разные графические изображения функций обязательно реагируют на изменение вида и режима обработки поверхностей, но «чувствительность» предложенных графических критериев различна, это и предопределяет их предпочтительное применение для решения практических задач разной степени значимости.

Исследовались такие виды обработки, как точение, фрезерование, шлифование, электроискровая обработка, и везде наблюдалась четкая и однозначная технологическая управляемость графическими критериями. На рис. 4 иллюстрируется влияние подачи даже на такой интегральный критерий, как функция распределения ординат (O_w) и тангенсов углов наклона (N_w) профиля [34], при алмазном точении латуни (числа на графиках обозначают величину подачи в миллиметрах на оборот).

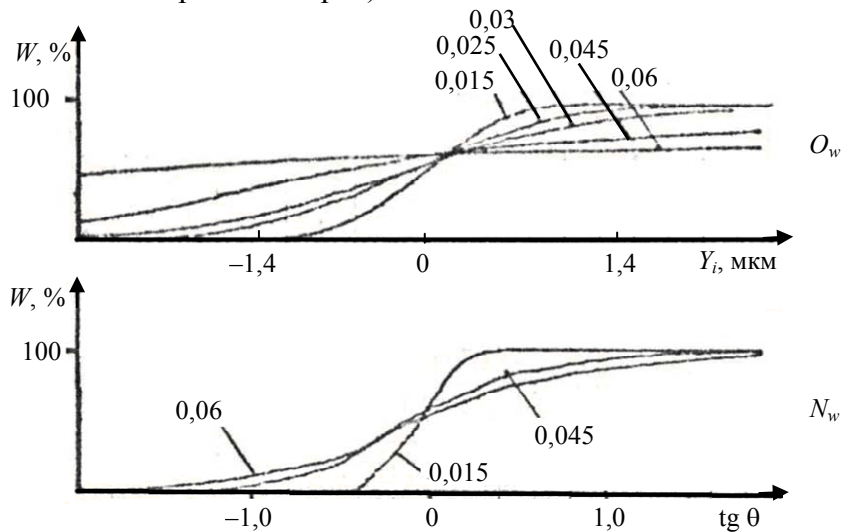


Рис. 4

На рис. 5 приведена плотность распределения ординат (a) и тангенсов углов наклона профилей поверхностей (b), обработанных импульсным микрофрезерованием (H — отношение числа ординат или тангенсов углов наклона текущей величины к количеству измеренных текущих величин; $\text{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона профиля; Rq — среднее квадратичное отклонение профиля от средней линии, мкм) [22]. В этом случае исследовалось влияние амплитуды импульса на шероховатость поверхности при импульсном фрезеровании (производилась дополнительная осцилляция инструмента). Обработка образцов производилась на прецизионном вертикальном обрабатывающем центре Realmeca RV-2 5A SP с использованием концевой твердосплавной фрезы диаметром 6 мм. Охлаждение выполнялось

с помощью эмульсии. Образцы фрезеровались при следующих параметрах обработки: подача — 450 мм/мин, частота вращения фрезы — 90 000 об/мин, глубина резания — 0,5 мм. Амплитуда импульса изменялась от 10 до 25 мкм с шагом 5 мкм.

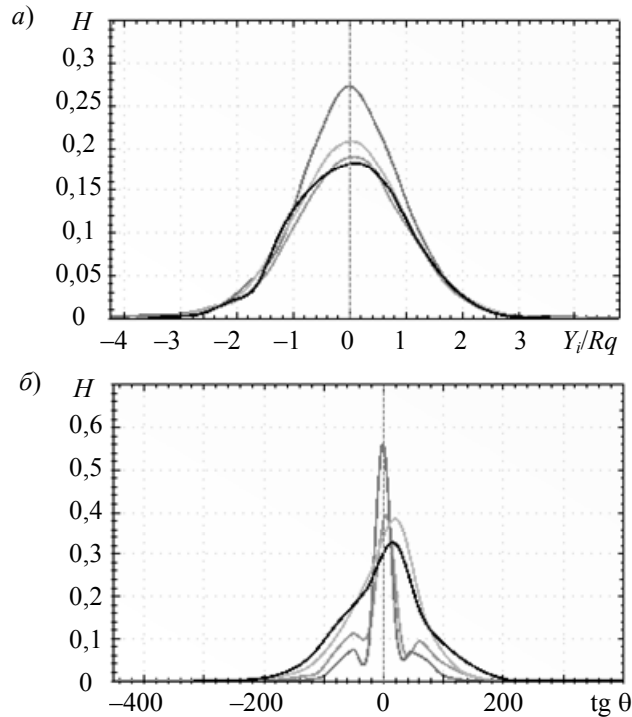


Рис. 5

На рис. 6 и 7 представлены плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей, полученных с помощью электрофизической (электроискровой) технологии на восьми различающихся длительностью импульса режимах обработки. Длительность импульса составила для исследуемого образца 1 — 23,7; 2 — 42,2; 3 — 56,2; 4 — 75; 5 — 100; 6 — 133,4; 7 — 154; 8 — 205,4 мс [21].

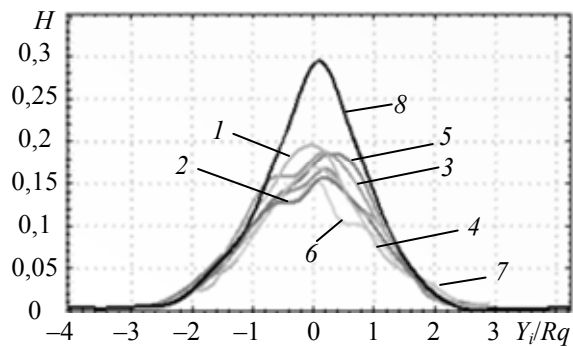


Рис. 6

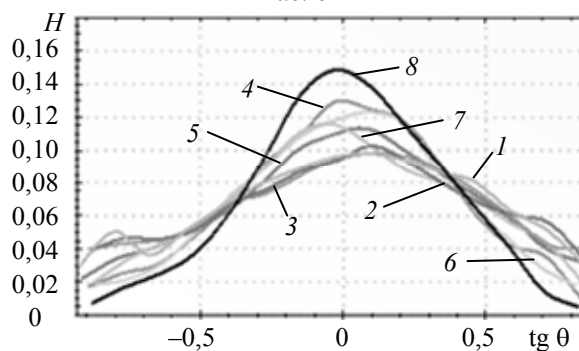


Рис. 7

Приведем методику технологического обеспечения оптимальной микрогеометрии обрабатываемых функциональных поверхностей деталей:

- 1) изготавливается максимально возможное в конкретных производственных условиях число образцов, различающихся только исходной микрогеометрией поверхности;
- 2) для каждого образца фиксируются виды и режимы обработки;
- 3) испытывается требуемое свойство (в одинаковых условиях) всех образцов;
- 4) технологические методы воспроизведения экспериментально определенного наилучшего микрорельефа для заданного функционального свойства поверхности выявляются автоматически;
- 5) вся технологическая информация по изготовлению наилучшего образца заносится в базу данных по установлению оптимальной микрогеометрии и технологических методов ее обеспечения; при заполненной базе данных не требуется проведение специальных экспериментов;
- 6) технология изготовления лучшего образца нормируется в технологию изготовления серийной продукции.

Контроль полученной микрогеометрии на соответствие заданной. Ранее шероховатость (микрогеометрия) поверхностей деталей регламентировалась с помощью классов, каждому из которых соответствовал специально изготовленный образец, а соответствие указанным на чертеже классам реально полученной шероховатости оценивалось визуально. Главные недостатки такого подхода — несовершенство зрения человека и субъективность; ныне действующие стандарты имеют, по нашему мнению, еще больший недостаток — слишком низкую информативность параметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей.

Неэффективность использования стандартных параметров микрогеометрии поверхностей доказывают публикации отечественных и зарубежных авторов, предлагавших все новые параметры либо так называемый комплексный параметр, обеспечивающий корреляцию с конкретными функциональными свойствами поверхностей. При этом зарубежные исследователи стремились найти наиболее удобную для практики совокупность параметров, точно описывающую исследуемый профиль [37—43], а отечественные исследователи в основном искали „чудо-параметр“, который бы предопределял функциональное свойство поверхности [10—13]. В теории случайных функций и случайных полей давно доказана бесперспективность нахождения такого параметра.

Изложим суть методики оценки и контроля микрогеометрии с использованием графических критериев:

- до испытаний серии образцов на конкретное функциональное воздействие с поверхности каждого образца необходимо снять профиль или микротопографию, с помощью соответствующей программы обработать информацию и результаты обработки занести в базу данных;
- в качестве эталона следует использовать любой непараметрический критерий, например, график функции распределения ординат профиля или кривую Аббота, полученные для лучшего по результатам испытаний образца;
- в зависимости от степени важности изделия можно установить конкретный допуск на отклонение непараметрического критерия контролируемого образца от эталонного критерия (см. рис. 3);
- при контроле микрогеометрии серийного образца достаточно совместить соответствующий графический критерий, полученный для контролируемой поверхности, с эталоном;
- если графическое изображение критерия не выходит за пределы допуска относительно эталона, микрогеометрию следует считать удовлетворительной;
- при выходе графического критерия за пределы допуска следует браковать изделие по требованиям к микрогеометрии поверхности.

Подход с нормированием не параметров микрогеометрии, а зависящих от нее свойств поверхностей, и с присвоением этим свойствам постоянных номеров, содержит дополнительную внутреннюю логику. Иногда современный конструктор, предоставляющий на чертеже значения каких-либо параметров микрогеометрии, даже не знает их сущности, а нормирование функциональных свойств исключает такое „слепое“ нормирование. Физический смысл параметров микрогеометрии, в основном в силу их практической бессмысленности, легко забыть, но функциональное назначение создаваемого изделия известно.

С целью обеспечения быстрого, надежного и недорогого контроля микрогеометрии поверхностей нами разработаны и зарегистрированы программные продукты [44, 45] для автоматизированных оценки и контроля микрогеометрии поверхностей с использованием графических критериев (на основе профилей — двумерный случай и на основе микро топографий — трехмерный). Программа написана для платформы .NET Framework 3.5 в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008 на языке C#. Для отображения двумерных графиков и гистограмм используется ZedGraph версии 5.1.5. Для вывода на экран микро топографий поверхности и других трехмерных графиков используется библиотека OpenTK версии 1.1.

Файл, описывающий профиль поверхности, в общем случае содержит информацию об ординатах профиля и соответствующих им абсциссах. Программа поддерживает следующие форматы:

- xls (используется в измерительно-вычислительном комплексе «Профиль»);
- asc (используется в профилографе-профилометре Hommel Tester T8000 фирмы Hommel werke);
- txt (используется в настольном контактно-щуповом профилометре Surtronic 3+ фирмы Taylor-Hobson);
- prf (используется в контактно-щуповом профилометре Form Talysurf Series 2 фирмы Taylor-Hobson);
- pr (используется в лазерном профилометре UBM-Microfocus Compact).

Поскольку на предприятиях продолжают использовать ГОСТ 2789-73 для оценки, контроля и оптимизации поверхности, было необходимо автоматизировать подсчет параметров микрогеометрии в разработанном программном продукте. Это также было нужно для сравнения параметрических и графических критериев между собой.

Графические критерии содержат более полную, нежели параметрические критерии, информацию о профиле поверхности. Однако информативность графических критериев различается. Так, кривая Аббота и графики функции распределения ординат и тангенсов углов наклона используются для контроля менее значимых и ответственных поверхностей. Отдельные выступы или впадины практически не влияют на форму этих графиков. В то же время на графиках функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля эти выступы и впадины четко видны. Но наибольший объем информации о профиле содержит профилограмма, поэтому следует разрабатывать механизмы сравнения профилей по их профилограммам.

Кратко опишем алгоритмы расчета для построения графических критериев. В общем случае алгоритм расчета функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля следующий.

1. Весь диапазон значений (ординат или тангенсов углов наклона) разбивается на участки одинаковой длины — интервалы группировки данных. Число интервалов k выбирается по формуле Стерджесса [46]:

$$k = 1 + 3,322 \lg N, \quad (1)$$

где N — общее количество тангенсов или ординат; дробное значение k округляется до ближайшего целого.

Подсчитывается число попаданий ординат (рис. 8, б) или тангенсов углов наклона профиля (а) по длине профиля L (y_i — отклонение i -й точки профиля от средней линии; α_i — угол наклона профиля в i -й точке) в каждый интервал (частота попадания).

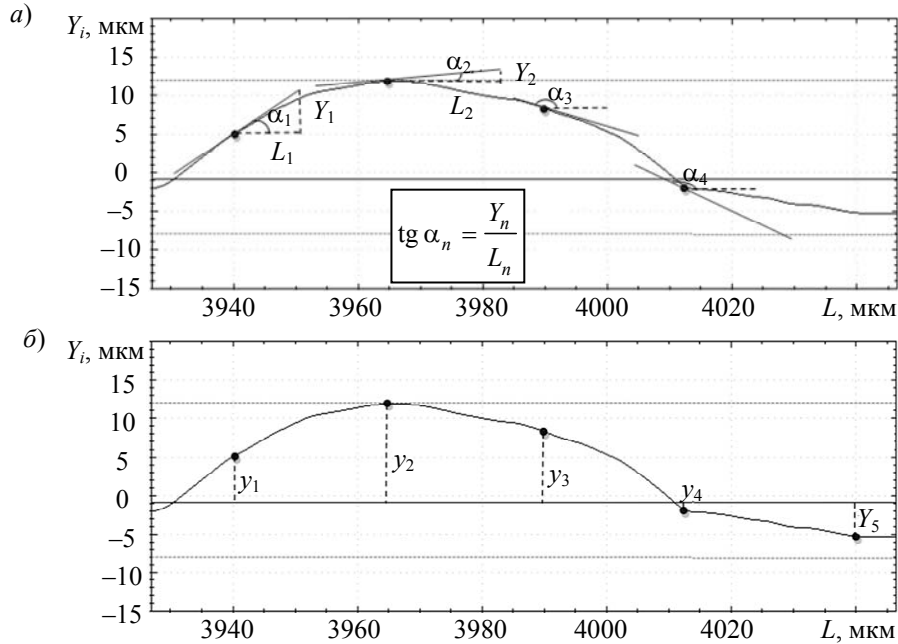


Рис. 8

При построении графика плотности распределения по оси абсцисс откладываются интервалы ординат профиля или тангенсов его углов наклона, по оси ординат — количество ординат или тангенсов, попавших в этот интервал (рис. 9 и 10, K — частота, т.е. число точек профиля, имеющих данную ординату).

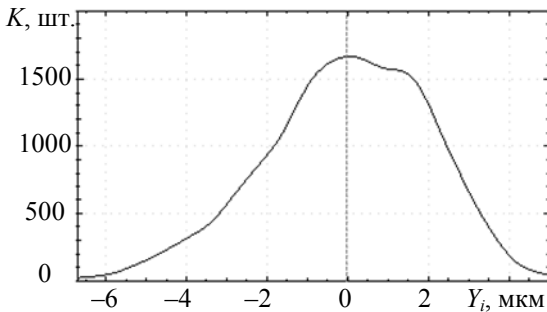


Рис. 9

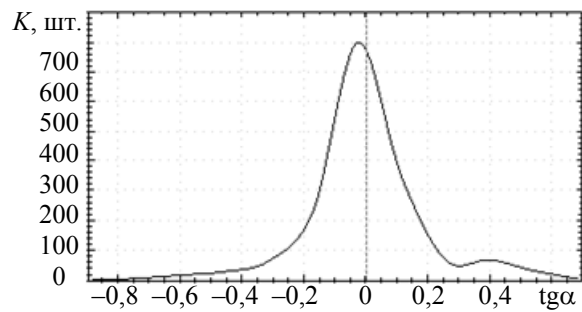


Рис. 10

Исследовалась гипотеза о нормальности распределения ординат профиля [16] с помощью критерия согласия $n\omega^2$. В целом доказано, что эта гипотеза „приемлема для поверхностей, обработанных абразивными инструментами, а также металлическими инструментами на отделочных режимах“ [16, с. 206], в то же время она непригодна при обработке на черновых, а временами и чистовых, режимах (например, когда в профиле содержится мощная периодическая составляющая). Отличие текущего закона распределения функции от нормального можно оценить по критерию Колмогорова [47].

2. С помощью плотности распределения ординат безразмерного профиля можно сравнивать профили со сколь угодно различающимися отклонениями от средней линии (с совпадающей длиной базовой линии, а также с разной дискретностью профиля, т.е. количеством точек на базовой длине).

3. Для получения плотности распределения ординат безразмерного профиля из обычной плотности распределения ординат необходимо:

- определить значение Rq данного профиля;

- разделить каждое значение ординат исходного профиля на полученное значение Rq ;
- по полученному профилю с безразмерными ординатами построить плотность распределения этих ординат.

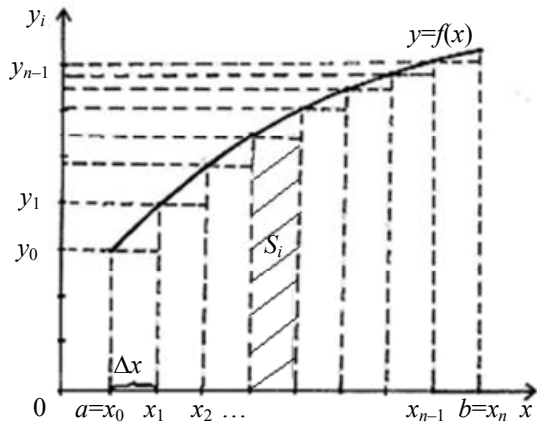


Рис. 11

Графики функции распределения ординат или тангенсов угла наклона профиля, а также кривая Аббота несут меньше информации о профиле, чем графики функции плотности распределения этих величин. Эти интегральные графические критерии можно использовать для приблизительной оценки влияния микрогеометрии на эксплуатационное свойство поверхности. Функцию распределения можно вычислить как интеграл от плотности распределения по методу прямоугольников [48] на отрезке от точки a до точки b (рис. 11; y_0, y_1, y_n — значения функции $y=f(x)$ в точках x_0, x_1, x_n).

Для нахождения интеграла функции S необходимо сначала разделить отрезок на n равных частей длиной $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ а затем применить следующую формулу:

$$S \approx \sum_{i=1}^n S_i = y_0\Delta x + y_1\Delta x + y_2\Delta x + \dots + y_{n-1}\Delta x. \quad (2)$$

Полученные в программе графики функции распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

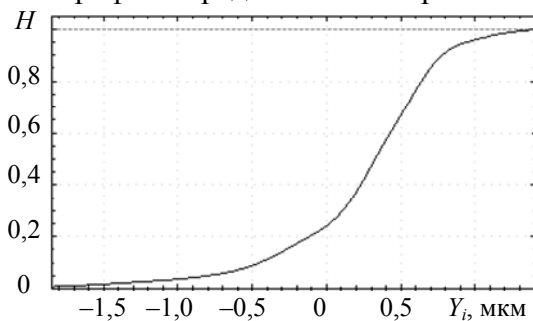


Рис. 12

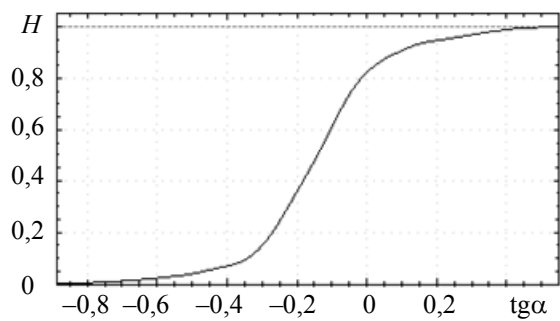


Рис. 13

Для дальнейшего сравнения профилей применяется функция распределения ординат безразмерного профиля (рис. 14).

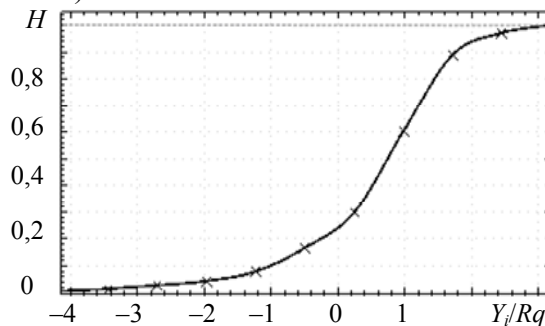


Рис. 14

Для определения влияния микрогеометрии на эксплуатационное свойство необходимо сначала исключить из профиля такие факторы, как помехи и погрешность установки. Влияние помех, особенно со стороны окружающей среды, неизбежно при записи профилей, к тому же для полного нивелирования погрешности установки контролируемого

изделия потребовалось бы много времени. В то же время применение механической или электрической фильтрации в профилометре, не всегда удобно. Например, для правильной настройки предустановленных фильтров необходимо обладать информацией об их возможностях, а для старых моделей функция настройка фильтров даже не доступна. Использование ЭВМ позволяет фильтровать профиль с помощью прямого и обратного преобразования Фурье [49].

После прямого преобразования Фурье можно получить амплитудный спектр профиля, где каждой гармонике соответствует определенный тип отклонений, например, отклонение формы, погрешность установки, волнистость, помехи. После удаления ненужной информации из амплитудного спектра и обратного преобразования Фурье будет получен профиль, в котором содержится только необходимая нам информация. Таким образом можно определить не только влияние микрогеометрии на эксплуатационное свойство, но и, например, отдельно влияние волнистости.

Для проведения фильтрации используется алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием по частоте [49].

После прямого фурье-преобразования можно построить амплитудный спектр профиля (рис. 15, A и f — амплитуда и частота гармоник профиля).

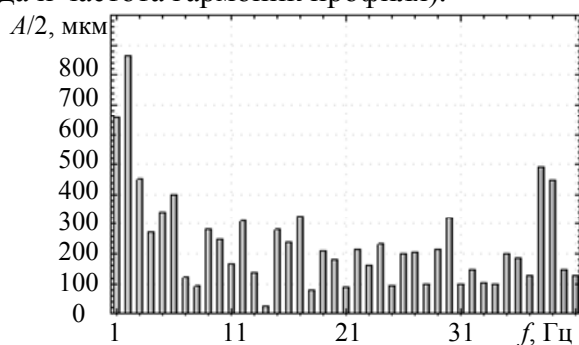


Рис. 15

В алгоритме пользователь выбирает гармоники, которые он хочет убрать из амплитудного спектра. Доказано [41, 50], что самая низкочастотная гармоника содержит информацию об отклонении формы поверхности, а также перекосе контролируемой поверхности при ее установке, вторая и третья гармоники обычно содержат информацию о волнистости, падающая часть спектра включает информацию о шероховатости, а незатухающая высокочастотная часть спектра — о помехах. Таким образом, возможно убрать из профиля ненужную информацию и производить оценку только по необходимому виду отклонений поверхности.

Полученный после обратного фурье-преобразования массив является нужным нам отфильтрованным профилем (рис. 16, 1 — профиль до фильтрации; 2 — после фильтрации). В рассмотренном случае в амплитудном спектре убраны первые три самые низкочастотные гармоники, т.е. из профиля исключена информация об отклонении формы, погрешности установки, а также волнистости.

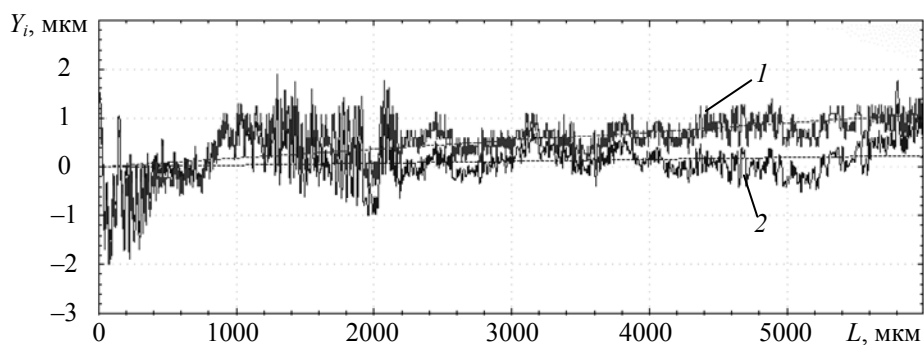


Рис. 16

После фильтрации профилей можно проводить их сравнение. Алгоритм сравнения двух и более профилей следующий. Исследователь (например, технолог) выбирает реальную поверхность изделия (эталон), микрогеометрия которой была признана наилучшей из возможных в процессе испытаний для заданного свойства, а соответствующий графический критерий оценки этой микрогеометрии принимается в качестве эталона, с которым сравниваются соответствующие графические критерии, полученные для поверхностей контролируемой серийной продукции. Для эталонной и сравниваемых поверхностей строятся графические критерии, например, плотности распределения ординат профиля. Далее графические критерии накладываются друг на друга, при этом для эталонного критерия предварительно задается поле допуска, величина которого выбирается в зависимости от назначения поверхности контролируемого изделия.

Затем определяется, удовлетворяют ли графические критерии сравниваемых поверхностей указанному полю допуска или выходят за него. Пример поверхностей, не удовлетворяющих допуску эталонной поверхности, представлен на рис. 17 (1 — эталонный критерий с допуском, 2 — критерий контролируемой поверхности).

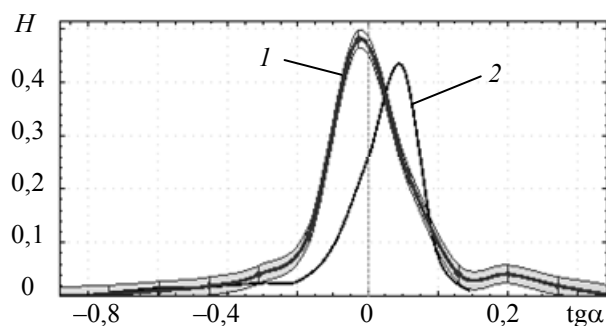


Рис. 17

Для эталонного профиля поверхности строятся графики функции плотности распределения и функции распределения ординат безразмерного профиля, графики функции плотности распределения и функции распределения тангенсов углов наклона профиля, а также кривая Аббота. Для этих графиков строится область допуска. В программе область допуска может рассчитываться по методу расчета относительного или абсолютного допуска или по методу расчета допуска по шкале.

Известно, что графические критерии для микрофотографий поверхности более информативны, чем графические критерии для профилей поверхности. Поэтому расширение непараметрического подхода на микрофотографии и его автоматизация позволяют добиться большей достоверности результатов оценки и контроля. Однако самой полной информацией о микрогеометрии обладает микрофотография поверхности.

Информация о микрофотографии в виде трехмерных координат точек поверхности поступает от специальных приборов — профилографов. Формат файла зависит от производителей программного обеспечения. Программа поддерживает следующие форматы:

- pr (лазерный профилометр UBM-Microfocus Compact;
- dat (машина для нанопозиционирования и наноизмерения, изготовленная в Техническом университете г. Ильменау, Германия).

Полученные с профилометров входные данные обрабатываются, и в программе происходит заполнение трехмерного массива пространственными координатами точек полученной микрофотографии поверхности. Далее на экран выводится микрофотография с цветовой индикацией высоты профиля (рис. 18).

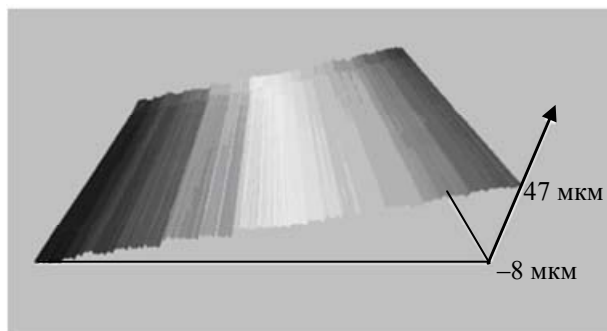


Рис. 18

Необходимым предварительным этапом для сравнения микротопографий поверхности является их фильтрация. С помощью фильтрации возможно как исключить ненужные виды отклонений поверхности (например, помехи, отклонение формы), так и определить влияние конкретного типа отклонений на какое-либо эксплуатационное свойство, например, волнистости. В данном случае используются алгоритмы прямого и обратного быстрых двумерных дискретных фурье-преобразований. Если представленную на рис. 18 микротопографию отфильтровать, оставив только микрогеометрию, то получим результат, представленный на рис. 19 (убраны погрешность установки, отклонение формы и волнистость поверхности).

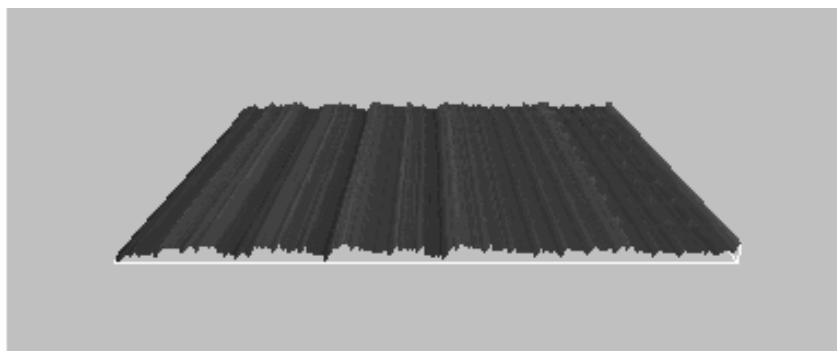


Рис. 19

В качестве графических критериев для контроля и оценки микрогеометрии поверхности в данном случае выступают графики функций распределения и функций плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона микротопографии. Эти графические критерии содержат больше информации о микрогеометрии поверхности по сравнению с представленными выше графическими критериями для профилей.

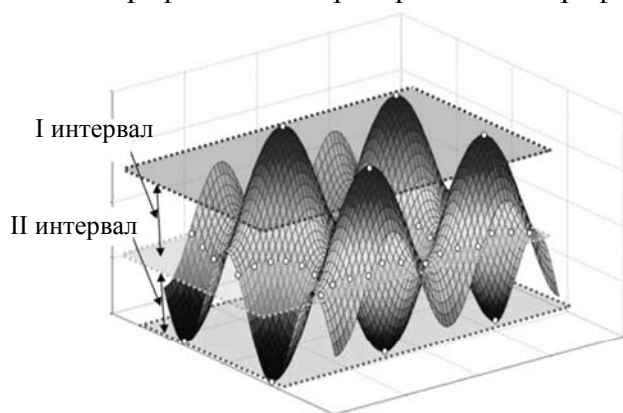


Рис. 20

Приведем алгоритм расчета функции плотности распределения:

— нахождение функции так называемой „средней плоскости“ (плоскость, проведенная так, что среднеквадратическое отклонение микротопографии до нее минимально, т.е. суммарный объем пустот под ней равен суммарному объему материала над ней);

— так же, как и в случае построения функции плотности распределения для профиля поверхности, весь диапазон ординат профиля разбивается на интервалы группировки данных. Секущие плоскости проводятся параллельно „средней плоскости“ (рис. 20);

— подсчет числа попаданий ординат микротопографии в каждый интервал — определение частоты;

— построение графика плотности распределения: по оси абсцисс откладываются интервалы, по оси ординат — число ординат, попавших в этот интервал; пример плотности распределения ординат микротопографии представлен на рис. 21.

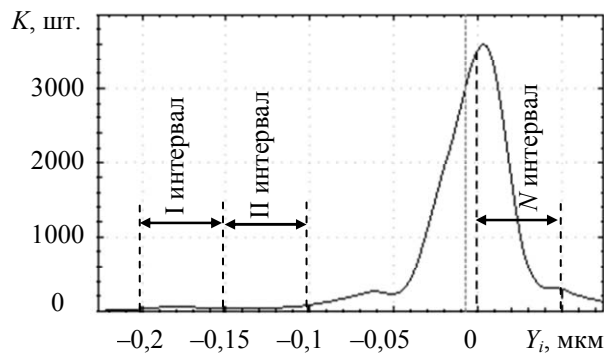


Рис. 21

Для сравнения графических критериев микротопографий используется плотность распределения ординат безразмерной микротопографии; алгоритм построения плотности распределения ординат безразмерной микротопографии (рис. 22, Sq — среднеквадратическое отклонение ординат исходной микротопографии) тот же, что и для плотности распределения ординат безразмерного профиля.

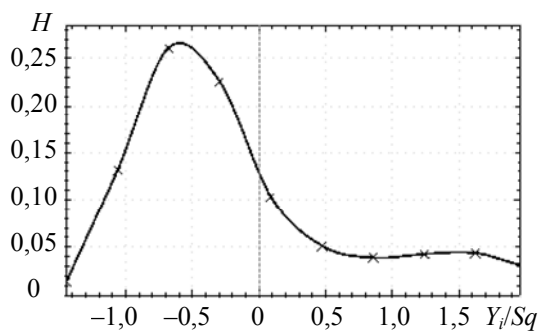


Рис. 22

В общем случае процедура оценки и контроля микротопографии с помощью графических критериев включает следующие этапы:

- выбор эталонной поверхности, микрогеометрия которой после испытаний была признана лучшей для данного эксплуатационного свойства, и построение для нее соответствующего графического критерия;
- выбор контролируемой поверхности (их может быть несколько);
- измерение микротопографии контролируемой поверхности с помощью профилографа;
- построение графика соответствующей функции контролируемой микротопографии;
- построение для графического критерия эталонной поверхности области допуска;
- наложение графических критериев эталонной и контролируемых поверхностей друг на друга;
- визуальное определение совпадения графиков в пределах допуска или выхода за область допуска.

Примеры сравнения графических критериев для контроля и оценки микротопографии поверхности представлены на рис. 23 (1 — эталонная поверхность с полем допуска; 2 — контролируемая поверхность).

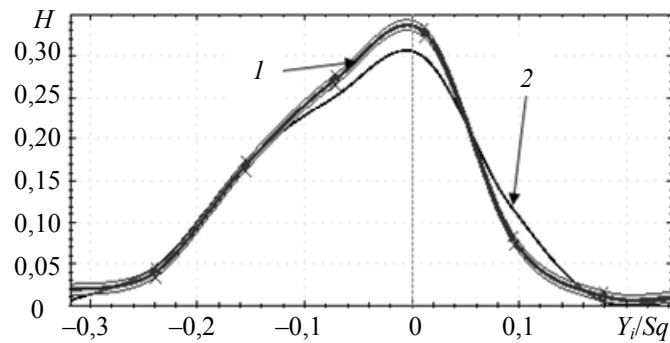


Рис. 23

Заключение. Конечно, оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей для их конкретных функциональных свойств — не единственная задача, по тем или иным причинам не решенная к настоящему времени, но к ее решению придется приступить, когда используемые подходы к повышению качества изделий станут экономически не выгодными. В настоящей статье предложен практически проверенный, эффективный и по всем показателям приемлемый метод решения этой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валетов В. А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Тр. ЛКИ. 1976. Вып. 108. С. 135—140.
2. Валетов В. А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндрической группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. 1983. Т. 4, № 6. С. 1104—1107.
3. Валетов В. А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. № 6. СПб: СЗПИ, 1997. С. 118—121.
4. Витенберг Ю. Р. Система характеристик шероховатости поверхности // Вестник машиностроения. 1970. № 11. С. 56—58.
5. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. М.: Судостроение, 1971. 98 с.
6. Демкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
7. Демкин Н. Б., Курова М. С. Распределение выступов и впадин профиля шероховатости поверхности // Изв. вузов. Машиностроение. 1975. № 7. С. 58—62.
8. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
9. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
10. Комбалов В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М.: Наука, 1983. 134 с.
11. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
12. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1974. 526 с.
13. Крагельский И. В., Комбалов В. С. Расчет величины стабильной шероховатости после приработки (упругий контакт) // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 3. С. 554—556.
14. Крагельский И. В., Рудзит Я. А. Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // Приборостроение. 1968. № 3. С. 15—24.
15. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 194 с.
16. Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.

17. Рудзит Я. А. О параметрах шероховатости поверхностей, обработанных абразивными инструментами // Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. Л.: СЗПИ, 1974. С. 63—75.
18. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77). Шероховатость поверхности: параметры, характеристики, обозначения.
19. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 247 с.
20. Иванов А. Ю., Леонов Д. Б. Влияние шероховатости поверхности на усилие распрессовки прессовых соединений // Научно-технический вестник ИТМО. 2013. № 3 (85). С. 147—150.
21. Медунецкий В. В. Исследование качества электроэродированных поверхностей с использованием непараметрических критериев: Дис. ...канд. техн. наук. СПб, НИУ ИТМО, 2013. 119 с.
22. Филимонова Е. А. Разработка методики и программы автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей деталей приборов с помощью графических критериев и их использование в технологических исследованиях: Дис. ...канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 125 с.
23. Юльметова О. С. Разработка технологических методов управления функциональными характеристиками узлов гироприборов: Дис. ...канд. техн. наук. СПб: СПб ИТМО, 2011. 120 с.
24. Юльметова О. С., Юльметова Р. Р., Сисюков А. Н. Разработка программы в среде Matlab для обработки и анализа микрогеометрии поверхности // Биомедицинские технологии, мехатроника и робототехника: Сб. тр. конф. молодых ученых. Вып. 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 300—304.
25. Valetov W. A., Grabow J. Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflaechenmikrogeometrie // 41 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. 1996. Bd 2. S. 622—625.
26. Valetov W. A., Grabow J., Tretiakow S. Zur experimentiellen Erforschung der Mikrogeometrie von Reibungsoberlaechen // 47 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. 2002. Tagussband. S. 403—404.
27. Waletow W., Stauffert G. Beobachtungen beim Rauheitmessen // Technische Rundschau. 1980. N 50/51. S. 16.
28. Валетов В. А. Влияние исходной микрогеометрии на коэффициент сопротивления качению и долговечность роликовых направляющих // Трение и износ. 1982. Т. III, № 5. С. 914—918.
29. Валетов В. А. Влияние исходной шероховатости поверхностей роликовых направляющих на их усталостную прочность // Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Новосибирск: НТО Машпром, 1982. С. 24—26.
30. Валетов В. А. Влияние фильтрации профиля на правильность оценки зависимости функциональных свойств поверхности от ее микрогеометрии // Вопросы изготовления, сварки и монтажа судостроительных конструкций. Л.: ЛКИ, 1982. С. 144—149.
31. Валетов В. А. Использование новых критериев для оценки микрогеометрии поверхностей деталей машин // Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1980. С. 23—25.
32. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
33. Валетов В. А. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. Л.: ЛИТМО, 1989. 100 с.
34. Валетов В. А. Развитие теории микрогеометрии поверхностей и разработка методов оценки ее влияния на эксплуатационные свойства деталей судового и общего машиностроения: Дис. ... докт. техн. наук. Л., 1982. 388 с.
35. Валетов В. А., Иванов С. Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем СПб – 2002 – С.164—167
36. Валетов В. А., Иванов А. Ю. Непараметрический подход к оценке качества изделий // Металлообработка. 2010. № 6. С. 55—59.
37. Arhard J. F. Elastic Deformation and the Contact of Surfaces // Nature. 1951. Vol. 172. P. 918—919.
38. Greenwood J. A., Tripp J. H. The elastic contact of rough spheres // ASME J. Appl. Mech. E. 1967. Vol. 34, N 1. P. 153—159.

39. Greenwood J. A., Williamson J. B. P. Contact of nominally flat surfaces // Proc. Roy. Soc. London. 1966. Vol. 295, N 1442. P. 300—319.
40. Nayak P. R. Random Process Model of Rough Surfaces // J. of Lubrication Technology. 1971. Vol. 93. P. 398—407.
41. Sayles R. S., Thomas T. R. Stiffness of Machine Tool Joints: A Random Process Approach // J. Eng. Ind. Trans. ASME. 1977. Feb. P. 250—256.
42. Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay. ASME B46.1–2002–IDT.
43. Surfaces roughness – Terminology – Pt. 1: Surface and its parameters. International Standard ISO 4287/1–1984.
44. . программы для ЭВМ № 2011613843 Программа автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей Свид. о гос. рег с помощью непараметрических критериев / В. А. Валетов, Е. А. Филимонова. Оpubл. 18.05.2011.
45. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2014614458. Программа автоматизированного контроля и оценки микрогеометрии поверхностей с помощью микро топографий / В. А. Валетов, Е. А. Филимонова. Заявл. 03.03.2014; опубл. 24.04.2014.
46. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М: Мир, 1978. 834 с.
47. Kolmogoroff A. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari. 1933. Vol. 4, N 1. P. 83—91.
48. Метод прямоугольника [Электронный ресурс]: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_прямоугольников>.
49. Снеддон И. Преобразования Фурье. М.: ИЛ, 1955. 668 с.
50. Whitehouse D. J., Archard J. F. The Properties of Random Surfaces of Significance in their Contact // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A 316. 1970. S. 97—121.

Сведения об авторе

Вячеслав Алексеевич Валетов — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Валетов В. А. Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 250—267.

PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF WORKPIECE SURFACE MICROGEOMETRY TO ENSURE SPECIFIC FUNCTIONAL PROPERTIES

V. A. Valetov

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valetov.v@mail.ru*

Optimization of surface microgeometry is proved to be advisable for provision of its specific functional properties; conditions for the optimization to be fulfilled are defined. Using concrete examples, microgeometry optimization on the base of parametric criteria of its assessment and control is shown to be practically impossible because of a wide range of parameters necessary for a processed surface description to be applied in serial production. A method is proposed for deduction of microgeometry being optimal (practically – the best of all feasible) for a specified property of a given workpiece surface. Technological ways for realization of the microgeometry in manufacturing process and fast, reliable, and low-cost control of the workpiece surface are developed. Computer programs using profiles and microtopographic data for control over a surface microgeometry on the base of graphic criteria are created. Examples of practical applications of the methods and programs are presented to demonstrate effectiveness of the proposed approach.

Keywords: exact description of microgeometry, standardization of microgeometry, technological provision of optimal microgeometry, control of obtained microgeometry, graphic criteria for workpiece surface microgeometry assessment and control.

Data on author

Vyacheslav A. Valetov — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru

Reference for citation: *Valetov V. A.* Problems of optimization of workpiece surface microgeometry to ensure specific functional properties // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie.* 2015. Vol. 58, N 4. P. 250—267 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-250-267

КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОЙ ПЛАТФОРМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М. Я. АФАНАСЬЕВ, А. А. ГРИБОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: griandrey@yandex.ru*

Приведены основные положения концепции адаптивной платформы технологического оборудования ADARTEQ. Сформулирован перечень задач, которые необходимо решить для реализации ADARTEQ. Представлены основные технические характеристики оборудования, которое может быть создано на базе ADARTEQ, приведены примеры его использования, рассмотрены вопросы реализации интеллектуальной системы подготовки данных и управляющих программ. Обоснована возможность применения ADARTEQ на малых инновационных предприятиях.

Ключевые слова: *система автоматизированного проектирования, трехмерная модель изделия, системы с числовым программным управлением, малое инновационное предприятие.*

Адаптивная платформа технологического оборудования (*ADaptive Platform of Technological Equipment, ADARTEQ*) представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий создавать различные виды технологического оборудования и средств технологического оснащения [1]. Основа ADARTEQ — универсальное шасси, которое играет роль механизма перемещения рабочих органов (сменных модулей), определяющих тип оборудования.

Универсальное шасси. Конструктивно шасси является координатным столом портального типа [2], его основные особенности:

- 1) низкая себестоимость производства, обусловленная модульностью конструкции и использованием дешевых стандартных комплектующих;
- 2) высокая точность позиционирования, обусловленная наличием датчиков обратной связи и простотой конструкции;
- 3) открытая программно-аппаратная архитектура;
- 4) простота переналадки.

На рис. 1 представлена принципиальная кинематическая схема шасси; здесь 1 — двигатель шаговый, 2 — энкодер инкрементальный, 3 — муфта кулачковая, 4 и 6 — подшипники шариковые радиальные, 5 — подшипник шариковый линейный, 7 — шариково-винтовая передача, 8 — шкив зубчатый, 9 — ремень зубчатый, 10 — направляющая цилиндрическая.

Изначально стол является двухкоординатным, третья координата — для снижения себестоимости шасси и упрощения конструкции — представляет собой отдельный модуль. Для многих типов оборудования, разрабатываемых в рамках концепции ADARTEQ, третья координата не требуется, для некоторых нужна с малым ходом и точностью, и лишь для самых сложных видов оборудования необходима полноценная высокоточная третья

координата. Возможность регулировки портала по высоте (рис. 2) позволяет достичь максимальной точности и жесткости конструкции с сохранением достаточно больших размеров рабочей области.

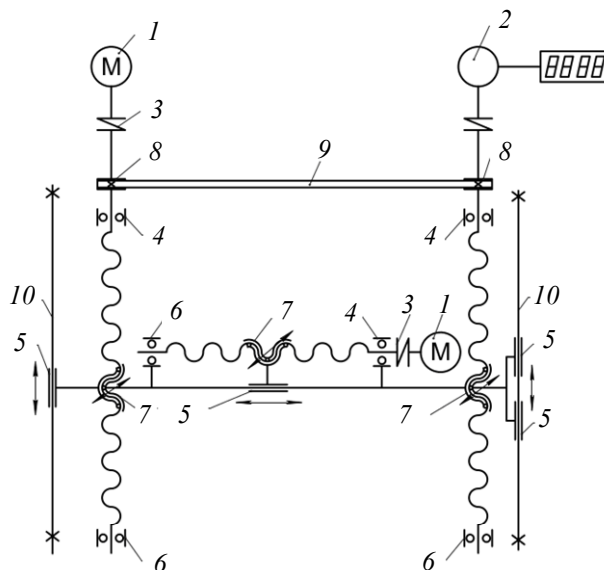


Рис. 1

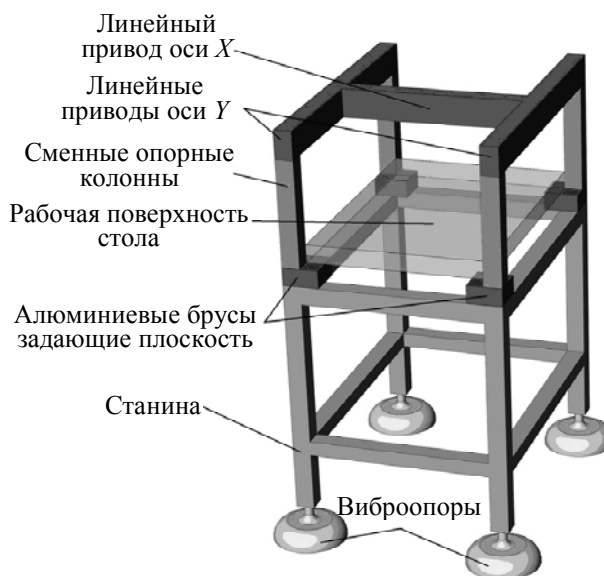


Рис. 2

ADAPTEQ можно представить как совокупность двух неизменных частей (шасси и универсальный модуль управления) и двух изменяемых (рабочий орган и программное обеспечение).

Двумя основными постулатами концепции разработки ADAPTEQ являются *унификация* и *гибридизация* [3—4]. Под унификацией понимается использование открытой программно-аппаратной архитектуры, позволяющей создавать новые типы оборудования и программного обеспечения по принципу „интеллектуального конструктора“.

Унификация достигается за счет представления изделия в виде крупных взаимозаменяемых блоков с четким описанием входных и выходных параметров каждого блока [5].

Первый блок — *шасси*. Для него должны быть четко прописаны габаритные размеры рабочей области, посадочные места для крепления рабочих органов, механические и электрические характеристики приводов.

Второй блок — *универсальный модуль управления*, для которого должны быть стандартизованы:

- электрические соединители, позволяющие подключать к нему шасси и вспомогательные блоки;
- сигналы (протоколы), с помощью которых осуществляется управление;
- внутреннее и внешнее представление управляющей программы;
- параметры и протокол связи с персональным компьютером.

Третий блок — *рабочий орган*, т.е. сопрягаемое с шасси и модулем управления устройство, которое определяет назначение оборудования, для него должны быть стандартизованы:

- максимальные габаритные размеры;
- посадочные места, а также способ сопряжения с модулем управления.

Рабочий орган — наиболее сложная часть всей концепции, поэтому он требует наиболее полного описания и стандартизации. На конструкцию рабочего органа должны быть наложены определенные ограничения [6], позволяющие беспрепятственно интегрировать спроектированный на его основе модуль с шасси и модулем управления. К таким ограничениям можно отнести, например, максимальную массу, напряжение питания, количество используемых шаговых или серводвигателей и их мощность.

Замена рабочего органа позволит создавать с использованием концепции ADAPTEQ следующие виды оборудования: фрезерные станки, граверы, лазерные резаки, 3D-принтеры, контрольно-измерительные машины, машины для установки компонентов на печатную плату, маркировщики, сортировщики, дозаторы химических реактивов, декартовые роботы.

Четвертый блок — *совокупность программного обеспечения*, необходимого для подготовки управляющих программ на языке ISO-7bit [7] и программного обеспечения микроконтроллера универсального модуля управления (т.н. „прошивка“). Подготовка управляющих программ осуществляется с помощью набора программных средств с открытым исходным кодом [8] — TAPS (*Technological Automation Python based System*). TAPS представляет собой интерфейс обмена данными между различными пакетами прикладных программ технологического назначения [9—11]. Унификация программного обеспечения достигается благодаря использованию стандартизованного интерфейса между TAPS и „прошивкой“.

Гибридизация ADAPTEQ обеспечивается унификацией, так как использование унифицированных и сопрягаемых между собой модулей позволяет создавать новые виды оборудования на базе существующих. Например, можно создать аддитивно-субтрактивную установку быстрого прототипирования, сочетающую в себе характеристики 3D-принтера и трехкоординатного фрезерного станка или совместить фрезерную головку для черновой обработки заготовок с лазером с целью полирования определенных поверхностей [12]. Для этого на базе спецификации и путем ограничений перемещений рабочего органа могут быть созданы гибридные фрезерно-печатающие или фрезерно-полирующие головки, а также гибридное программное обеспечение, работающее с одной трехмерной моделью вначале для послойного разбиения, а затем для селективной доработки некоторых поверхностей напечатанного изделия фрезером (лазером).

Область применения ADAPTEQ. В последние годы в России появляется все больше малых инновационных предприятий (МИП) [13], относящихся к одному из видов структуры новаторского типа, которая получила название „стартап“ (*start-up*). Особенностью такого предприятия является нацеленность на производство конкретной продукции. Пока не сформировалось однозначное представление о том, что такое МИП; до сих пор оно определялось как предприятие, разрабатывающее и внедряющее в производство наукоемкие технологии и изделия.

Можно дать следующее определение: *малое инновационное предприятие* — это объединение специалистов, имеющих определенные знания, аппаратные и программные ресурсы

для решения задач подготовки производства или непосредственного производства продукции. Можно выделить три основных типа МИП: инжиниринговые центры; малые производства; FabLab (от *fabrication laboratory* — производственная лаборатория) [14].

Инжиниринговые центры представляют собой организации, оказывающие комплекс коммерческих услуг по подготовке и обеспечению процесса производства и реализации продукции, по обслуживанию и эксплуатации промышленных, инфраструктурных и других объектов.

Инжиниринговые центры формируются на базе тех ресурсов, которые не задействованы в производственном процессе, задействованы не полностью или не предназначены для производства продукции. Таким образом, инжиниринговые центры формируются на базе промышленных предприятий или учебных заведений с подготовленной базой современного оборудования.

„Малое производство“ — это небольшая подрядная организация, не имеющая своей номенклатуры производимых изделий и работающая только с заказами. Основной целью МИП данного типа является выпуск продукции, которая может быть использована как конечным пользователем, так и другими предприятиями при производстве своей продукции.

FabLab — это производственная мастерская коллективного пользования, предоставляющая на коммерческой или безвозмездной основе доступ к различному высокотехнологичному оборудованию [15]. Как правило, FabLab располагает набором средств, позволяющим выпускать различные инновационные продукты, в том числе и мелкими сериями.

Очевидно, что для создания МИП любого из перечисленных типов необходимо большое количество разнообразного, зачастую очень дорогого, технологического оборудования. В то же время задачи, решаемые в рамках МИП, не требуют высокой точности или производительности оборудования, поэтому основной областью применения ADAPTEQ могут стать именно МИП.

Заключение. Предполагается разработка на базе платформы ADAPTEQ трехкоординатного шасси порталной конструкции, универсального модуля управления, модульного программного обеспечения с открытым исходным кодом, а также набора требований для проектирования рабочих органов, определяющих основное назначение оборудования, создаваемого на базе концепции.

Концепция ADAPTEQ позволит малым инновационным предприятиям иметь универсальную платформу, на базе которой они самостоятельно (или с привлечением сторонних специалистов) смогут создавать все необходимое для них оборудование не только для производства готовых изделий, но и для проведения всего комплекса исследований, связанных с этим процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 3.1109–82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий; Введ. 01.01.83. М.: Стандартинформ, 2012. С. 91—92.
2. Pat. N 3783741 US. Program controlled coordinate machine / *Altzschner G.* et al. 1974.
3. *Норенков И. П.* Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 430 с.
4. *Боровков А. И.* и др. Компьютерный инжиниринг. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 93 с.
5. *Wang Y.* et al. The research of CNC machine appearance design based on evolution theory // IEEE Intern. Conf. on Management of Innovation and Technology (ICMIT). 2010. P. 875—879.
6. *Liang R. Y.* et al. The Design of IPC Chassis Structure Based on CNC System // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 819. P. 277—280.

7. ГОСТ 20999-83. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ. Введ. 28.03.83. М.: Изд-во стандартов, 1983. 28 с.
8. Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Open Source подход к программному обеспечению в приборостроении // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 281—282.
9. Лутц М. Программирование на Python. СПб: Символ-Плюс, 2002. 1136 с.
10. Лутц М. Изучаем Python. СПб: Символ-Плюс, 2009. 848 с.
11. Саммерфилд М. Программирование на Python 3. СПб: Символ-Плюс, 2002. 608 с.
12. Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Декомпозиция структуры трехмерных моделей на наборы конструктивных элементов с использованием примитивов // Сб. тез. докл. конф. молодых ученых. Вып. 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. С. 281.
13. Валдайцев С. В., Молчанов Н. В., Пецольт К. Малое инновационное предпринимательство. М.: Проспект, 2014. 536 с.
14. Posch I. et al. Introducing the FabLab as interactive exhibition space // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Interaction Design and Children. ACM. 2010. P. 254—257.
15. Posch I., Fitzpatrick G. First steps in the FabLab: experiences engaging children // Proc. of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conf. ACM. 2012. P. 497—500.

Сведения об авторах

- Максим Яковлевич Афанасьев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: amax@niuitmo.ru
- Андрей Александрович Грибовский** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: griandrey@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 268—272.

CONCEPT OF ADAPTIVE PLATFORM OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

M. Ya. Afanasiev, A. A. Gribovsky

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: griandrey@yandex.ru*

Principles of the concept of adaptive platform of technological equipment are presented. The problems to be solved to afford implementation of ADAPTEQ are formulated. Main technical characteristics of equipment to be designed on the base of ADAPTEQ are considered, the problems of realization of the intellectual system of data preparation for universal equipment with numerical control are described.

Keywords: computer-aided design, three-dimensional model of the product, CNC.

Data on authors

- Maxim Ya. Afanasiev** — PhD; ITMO University; Department of Instrumentation Technology, E-mail: amax@niuitmo.ru
- Andrey A. Gribovsky** — PhD; ITMO University; Department of Instrumentation Technology, E-mail: griandrey@yandex.ru

Reference for citation: Afanasiev M. Ya., Gribovsky A. A. Concept of adaptive platform of technological equipment // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 268—272 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 621.77
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-273-277

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ

Ю. П. КУЗЬМИН, К. П. ПОМПЕЕВ, А. А. ЦЕЛИЩЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kirpom@rambler.ru*

Исследуется возможность использования фрезерных станков с числовым программным управлением для регуляризации микрогеометрии поверхностного слоя заготовок. Рассматривается механизм образования регулярного микрорельефа на рабочих поверхностях деталей машин и приборов. Представлено уравнение зависимости для движения центра инструмента от входных параметров. Описана методика создания управляющей программы для систем числового программного управления Siemens и Fanuc по нанесению регулярного микрорельефа пластическим деформированием на плоские поверхности. Такой подход позволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин и приборов, автоматизировать процесс получения регулярного микрорельефа, существенно расширить его технологические возможности, с высокой точностью выдержать требования, заданные конструктором на чертеже, уменьшить время обработки, удешевив при этом производство, а также решить широкий спектр вопросов инженерии поверхности, включающий в себя возможность визуально оценить процесс создания исходного рельефа на поверхности заготовки.

Ключевые слова: *регулярный микрорельеф, моделирование, пластическая деформация, трение, ЧПУ.*

Разработанный профессором Ю.Г. Шнейдером научный подход к регуляризации микрогеометрии поверхности [1] позволяет создавать на поверхностях частично и полностью регулярный микрорельеф (РМР).

Однозначно задать профиль регулярного микрорельефа можно с помощью набора параметров, описанных в ГОСТ 24773-81 [2]. При этом полученный в результате обработки профиль РМР, так же как и шероховатость поверхности, описываются собственными наборами параметров [3, 4].

Согласно ГОСТ [2], регулярный микрорельеф, создаваемый синусоидальными канавками, определяется рядом параметров (рис. 1; S_o и S_k — осевой и круговой шаг неровностей; A — амплитуда непрерывной регулярной неровности; $\{i\}$ — дробная часть смещения последующей синусоиды относительно предыдущей).

Сущность научного направления состоит в том, что в результате обработки традиционными способами резания на рабочих поверхностях деталей машин и приборов образуется шероховатость, в то время как использование подхода [1] позволяет получить частично (ЧРМР) или полностью (ПРМР) регулярный микрорельеф (рис. 2, a — v и z соответственно)

с неровностями практически одинаковой формы, размеров и взаиморасположения. Это дает возможность не только рассчитывать значения всех параметров, но и устанавливать оптимальный вид регулярного микрорельефа.

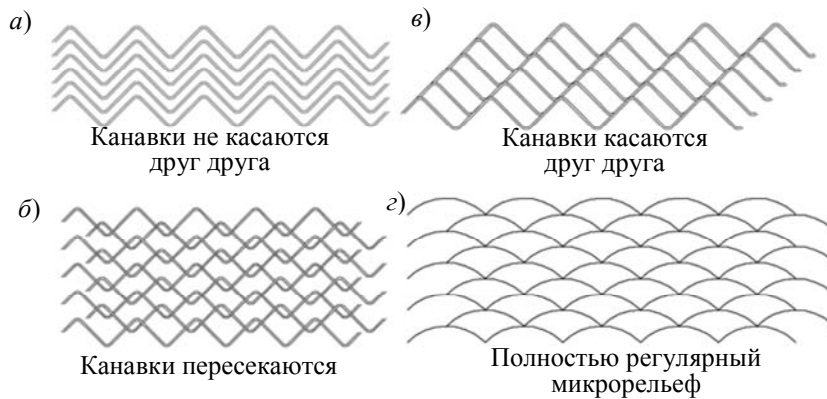
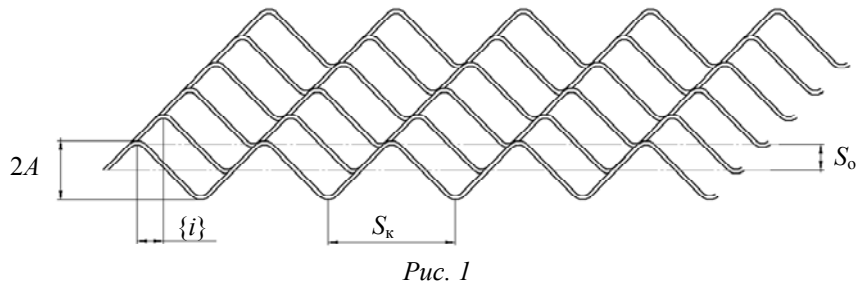


Рис. 2

Регуляризация микрорельефа поверхностей деталей машин и приборов производится в целях:

- снижения потерь на трение и исключения надиров, задиров и схватывания;
- повышения надежности и долговечности изделий;
- перехода на расчетные методы нормирования и технологического обеспечения микрогеометрии.

Основным методом нанесения РМР является пластическое деформирование поверхностного слоя обрабатываемой функциональной поверхности заготовки на универсальном станке с помощью алмазных наконечников, шаров или роликов. При этом необходимо использовать специальную виброголовку, что, в свою очередь, приводит к усложнению кинематики движения деформирующего элемента за счет обеспечения его осцилляции.

Перспективным направлением в области регуляризации микрогеометрии является использование фрезерных станков с ЧПУ, при котором не требуется выделять в ТП отдельную операцию и использовать для универсального оборудования специальные устройства с целью получения РМР. На фрезерном станке с ЧПУ возможно при обработке заготовки в той же операции получать РМР без ее переустановки. При этом исключаются вибрации деформирующего элемента, а траектория движения инструмента для получения РМР определяется соответствующей программой, управляющей кинематикой станка.

Для создания управляющей программы (УП) используется зависимость траектории движения инструмента от входных параметров. Используется следующее уравнение движения центра инструмента относительно n -й синусоиды [5]:

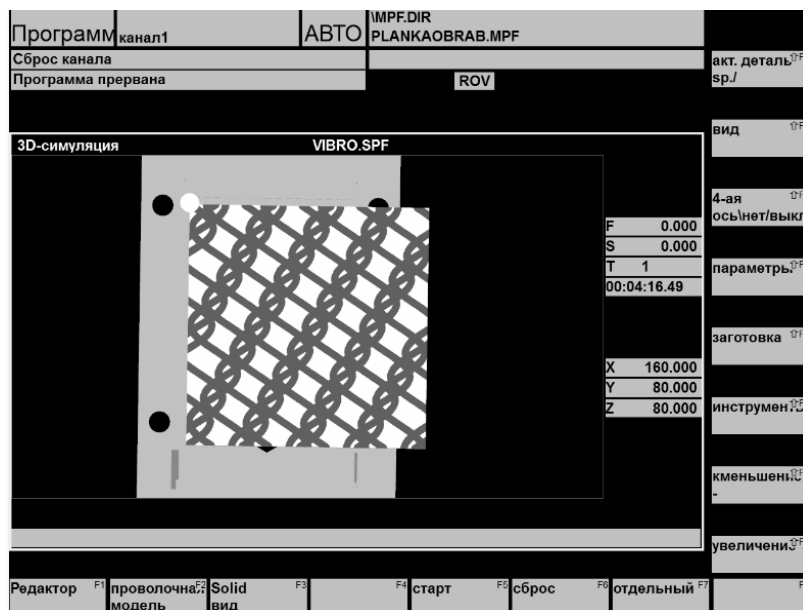
$$y_n = A \sin \left(2\pi \frac{x}{S_k} + 2\pi \{i\} n \right) + S_0 n,$$

Реальная форма синусоидальной канавки получается посредством аппроксимации перемещений рабочих органов оборудования. В частности, синусоида аппроксимируется ломан-

ной линией, вследствие чего возникает погрешность δ , которую можно свести к минимуму, по возможности уменьшив шаг аппроксимации.

Для визуализации процесса обработки использовался симулятор WinNC, разработанный фирмой EMCO (Австрия). Данный программный продукт содержит две системы ЧПУ для симуляции фрезерной обработки: Sinumerik и Fanuc. Эти системы имитируют ЧПУ промышленного станка. Для трехмерной симуляции фрезерной обработки используется программа Win3D-View, позволяющая не только увидеть все рабочие перемещения, но и проконтролировать возможность столкновения инструмента с установочно-зажимным приспособлением и заготовкой. Отработка траектории в системе Sinumerik происходит в режиме реального времени (рис. 3, а).

а)



б)

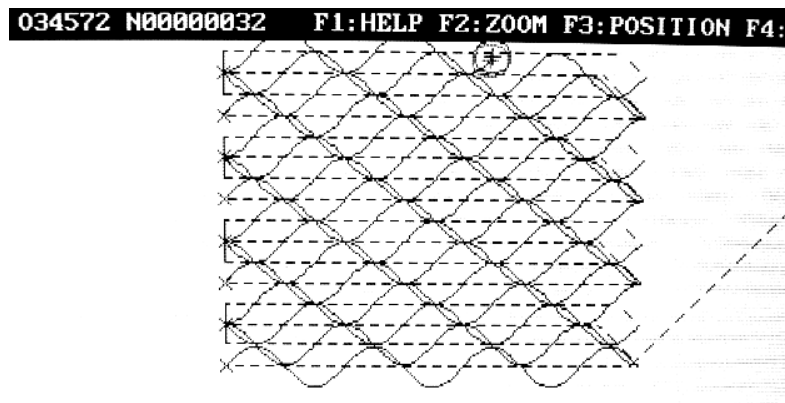


Рис. 3

Системы Sinumerik и Fanuc используют разные языки для параметрического программирования (макропрограммирования), поэтому невозможно для них создать единую УП.

Для симуляции процесса обработки заготовки в режиме реального времени использовалась система Fanuc (рис. 3, б).

Различие микрogeометрии, полученной с помощью Sinumerik и Fanuc, связано с использованием разных параметров в программе.

Таким образом, использование РМР позволяет сравнительно просто, без специальной оснастки, улучшить эксплуатационные свойства изделия. Объединение систем ЧПУ с технологической системой поверхностного пластического деформирования позволяет обрабатывать

плоские поверхности деталей машин программным способом, автоматизировать процесс получения РМР, существенно расширить его технологические возможности, с высокой точностью выдержать требования, заданные конструктором, и сократить время на подготовительные работы. Это позволяет решать широкий спектр вопросов инженерии поверхности, включая ее предварительное моделирование, анализ и обработку [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972.
2. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. Введ. 01.07.1982. М.: Изд-во стандартов, 1988.
3. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2007.
5. Голубчиков М. А., Кузьмин Ю. П. Образование регулярного микрорельефа на станке с ЧПУ // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 9. С. 34—38.
6. Федоров В. П., Нагоркин М. Н., Ковалева Е. В., Чмыхов Д. В. Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. №10.

Сведения об авторах

Юрий Петрович Кузьмин

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: up_kuzmin@mail.ru

Кирилл Павлович Помпеев

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: kirpom@rambler.ru

Андрей Александрович Целищев

— магистр; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: Tselishchevandrey@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Кузьмин Ю. П., Помпеев К. П., Целищев А. А. Использование фрезерного станка с ЧПУ для нанесения регулярного микрорельефа на поверхности заготовки // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 273—277.

APPLICATION OF MILLING MACHINE TO IMPRESSION A REGULAR MICRORELIEF ON PREFORM SURFACE

Yu. P. Kuzmin, K. P. Pompeev, A. A. Tselishchev

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kirpom@rambler.ru

The possibility of using CNC milling machines for regularization of microgeometry of preform surface layer is investigated. The mechanism of regular microrelief formation on working surfaces of machine components and appliances is considered. An equality describing the instrument center movement depending on input parameters is presented. A method of creating a control program for impression a regular microrelief by plastic strain applied to plane surface is described for numerical control systems Siemens and Fanuc. The proposed approach is reported to increase operational properties of the processed machine component, to allow for automation of the process of regular microrelief impression, to expand significantly technological capabilities of the process, to reduce the processing time and manufacturing cost, and to solve a wide range of problems of surface engineering including visual inspection of the preform surface processing.

Keywords: regular microrelief, simulation, plastic deformation, friction, CNC.

Data on authors

- Yury P. Kuzmin* — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: up_kuzmin@mail.ru
Kirill P. Pompeev — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: kirpom@rambler.ru
Andrey A. Tselishchev — Magister; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: Tselishchevandrey@yandex.ru

Reference for citation: *Kuzmin Yu. P., Pompeev K. P., Tselishchev A. A.* Application of milling machine to impression a regular microrelief on preform surface // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 4. P. 273—277 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-273-277

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

О. С. ЮЛЬМЕТОВА¹, С. Д. ТРЕТЬЯКОВ², В. А. ВАЛЕТОВ², А. Г. ЩЕРБАК¹

¹ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“, 197046, Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: valetov.v@mail.ru

Представлены методики экспериментальных исследований влияния шероховатости поверхностей деталей на конкретные эксплуатационные свойства гироскопа. Использование графических критериев оценки шероховатостей позволяет применять результаты экспериментов при изготовлении серийной продукции.

Ключевые слова: контрастность, шероховатость, непараметрические критерии.

Введение. В ряде случаев шероховатость поверхности влияет на функциональные свойства изделия, в частности, сплошного ротора бескарданного электростатического гироскопа (рис. 1).

Ротор, как видно из рисунка, представляет собой доведенную сферическую поверхность, на которую методом электрохимического травления наносится рисунок из восьми темных полос — растров [1, 2]. Опыт эксплуатации такого прибора позволяет выдвинуть предположение о влиянии шероховатости как базовой поверхности, так и поверхности рисунка, на оптические и динамические свойства ротора.



Рис. 1

Оптические свойства ротора зависят от значения коэффициента контрастности рисунка, обеспечивающего функционирование оптоэлектронной системы съема информации гироскопа. Динамические характеристики ротора определяются его допустимым дисбалансом — смещением центра масс относительно геометрического центра ротора.

В ходе работы гироскопа математическая обработка пространственной карты отражений светового сигнала, посылаемого датчиком на поверхность вращающегося ротора, позволяет получать данные об отклонении оси вращения (прецессии) ротора относительно корпуса прибора, поэтому контрастность и дисбаланс ротора так важны.

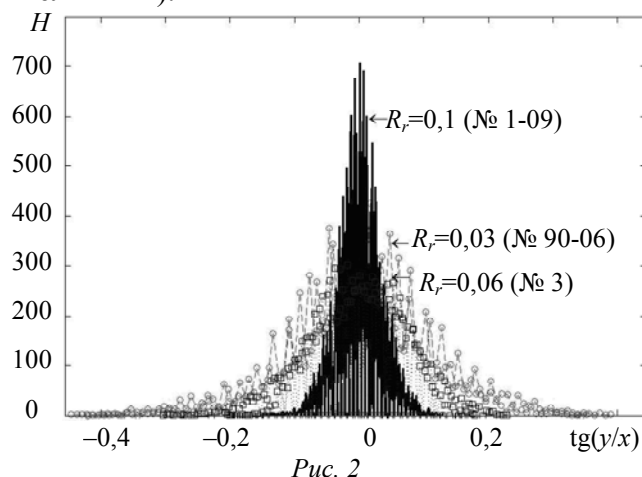
Однако проверка предположения о влиянии шероховатости на оптические и динамические характеристики ротора требует разработки определенных методик.

Методика экспериментальных исследований влияния шероховатости на оптические свойства ротора. Наиболее информативным способом описания шероховатости при оценке ее влияния на любые функциональные свойства поверхности, согласно [3], является использование графических изображений плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей. На отражательную способность поверхности наиболее существенно должны влиять углы наклона профилей, поэтому в качестве критерия оценки влияния шероховатости на оптические свойства поверхности используем графики плотности распределения тангенсов углов наклона профилей. Измерительная станция Hommel Tester T8000 позволяет строить графики некоторых функций, которые можно использовать для контроля и оценки шероховатости. Измерение оптических коэффициентов отражения поверхности обеспечивает микроскоп-спектрофотометр МСФУ-К.

Методика оценки влияния шероховатости на оптические свойства включает следующие этапы:

- 1) подготовка роторов, изготовленных по стандартной технологии;
- 2) измерение коэффициента отражения базовой поверхности R_b ;
- 3) измерение коэффициента отражения поверхности раstra R_r ;
- 4) измерение и построение плотностей распределения тангенсов углов наклона для доведенной поверхности ротора;
- 5) измерение и построение плотностей распределения тангенсов углов наклона для поверхности растров;
- 6) оценка корреляции плотностей распределения тангенсов углов наклона профилей с их коэффициентами отражения.

Реализация указанной методики позволила выявить, что плотности распределения тангенсов углов наклона доведенной поверхности ротора практически совпадают и коэффициенты отражения стабильно находятся в пределах от 0,40 до 0,42. На рис. 2 приведены плотности распределения тангенсов углов наклона растров роторов № 1-09, № 3 и № 90-06 (H — число тангенсов определенной величины).



Из рис. 2 видно, что коэффициенты отражения растров роторов R_r , изготовленных по заводскому технологическому процессу, варьируют в диапазоне 0,03—0,1, т.е. нестабильность значений коэффициентов контрастности обусловлена различием значений коэффициентов отражения растров R_r , полученных в ходе электрохимической операции.

Таким образом, указанная методика позволила выявить: во-первых, что разброс значений контрастности обусловлен нестабильностью электрохимической операции, а не механической доводкой; во-вторых, зависимость коэффициента отражения от графика плотности распределения тангенсов углов наклона профилей — чем меньше зона рассеяния и выше пик кривой распределения, тем больше степень отражения поверхности. Итак, корреляцию удалось выявить благодаря применению графиков плотности распределения тангенсов углов наклона профилей.

Методика экспериментальных исследований влияния шероховатости на дисбаланс ротора. Влияние шероховатости растрового рисунка на дисбаланс ротора может быть связано с асимметричностью рисунка, наносимого на его поверхность (ширина полос различается, как следствие — площадь поверхности разная). При этом особенностью электрохимического метода нанесения рисунка является необходимость обеспечения одинаковой плотности тока при получении широких и узких полос, вследствие этого электрохимические режимы травления широких и узких полос различаются. В свою очередь, разность режимов приводит к появлению разницы шероховатости на поверхности ротора, что может служить причиной изменения дисбаланса ротора.

Оценить это влияние можно с помощью методики, включающей следующие этапы:

- 1) подготовка роторов, изготовленных по стандартной технологии;
- 2) измерение коэффициентов дисбаланса после операции нанесения рисунка;
- 3) построение круглограмм в экваториальном сечении роторов и вычисление гармоник амплитудного спектра профиля;
- 4) поиск корреляции уровня дисбаланса с площадью под кривой амплитудного спектра.

Особенностью предложенной методики является применение в качестве непараметрических критериев оценки шероховатости поверхности площади под кривой амплитудного спектра профиля. Это решение находит теоретическое обоснование в том, что профиль поверхности следует рассматривать как реализацию случайной функции, полученной наложением шероховатости, волнистости и отклонения от формы, которую можно разложить в ряд Фурье. Графическая зависимость амплитуды гармоник от их частоты есть не что иное, как амплитудный спектр профиля. В полученном спектре низкочастотные гармоники содержат информацию об отклонениях формы поверхности. Падающая часть спектра несет в себе информацию о шероховатости профиля, незатухающая высокочастотная часть — о помехах [4].

Этот теоретический аспект нашел практическое применение в технологии изготовления ротора при контроле его формы. В рабочем технологическом процессе предусмотрен контроль первых гармоник: среднее значение амплитуды гармоник по четырем сечениям должно составлять не более 0,05 мкм (для второй гармоники), 0,025 мкм (для третьей), 0,015 мкм (для четвертой—шестой). Анализ и контроль остальных гармоник не осуществлялся. При этом наблюдается разброс дисбалансов роторов, изготовленных по единой технологии, в пределах 0,05—0,25 мкм.

Для оценки влияния не только формы ротора, описываемой первыми гармониками спектра, но и шероховатости поверхности, описываемой гармониками падающей части спектра (гармоники с 6-й по 208-ю), на базе предложенной методики оценки было исследовано влияние шероховатости на дисбаланс ротора.

Согласно описанной выше методике на первом этапе были проведены измерения радиальных дисбалансов для одиннадцати роторов. На втором этапе для каждого ротора был осуществлен контроль некруглости с построением круглограмм и вычислением всех амплитуд гармоник спектра на приборе Talyrond фирмы Taylor-Hobson. На третьем этапе были вычислены площади под кривыми гармонического спектра для каждого ротора. Полученные кривые зависимости дисбалансов роторов от площади гармоник спектров приведены на рис. 3 (D — диаметр ротора). Кривая 1 описывает зависимость значений коэффициентов дисбаланса от площади первых шести гармоник амплитудного спектра, нормируемых в рамках технологического процесса. Кривая 2 отражает зависимость значений дисбалансов от площади всех гармоник спектра (с 1-й по 208-ю гармоники) профилей 11 роторов.

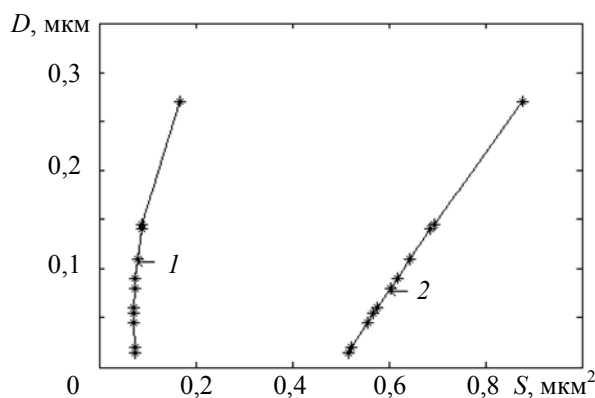


Рис. 3

Таким образом, кривая 1 отражает влияние формы ротора на дисбаланс, так как построена на базе первых гармоник амплитудного спектра профиля. Кривая 2 учитывает не только форму, но и влияние шероховатости на уровень дисбаланса, так как построена на базе всех гармоник спектра. Характер кривой 2 свидетельствует о том, что увеличение значения шероховатости (площади амплитудного спектра) ведет к увеличению дисбаланса ротора. Наряду с этим реализация описанной методики позволила выявить, что разброс дисбалансов роторов, изготовленных по единой технологии, отчасти может быть обусловлен отсутствием контроля шероховатости поверхности ротора после операции по нанесению рисунка.

Заключение. На базе непараметрических критериев оценки микрогеометрии — эмпирических плотностей распределения тангенсов углов наклона профиля и его амплитудного спектра — выявлено влияние шероховатости на коэффициент отражения и дисбаланс ротора электростатического гироскопа.

Реализация предложенных методик выявления влияния шероховатости на функциональные свойства позволила установить недостаточную управляемость существующей технологии нанесения растрового рисунка — локального электрохимического травления. Поэтому в качестве более прогрессивной технологии нанесения рисунка было предложено использовать лазерное маркирование [5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-31097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев С. Н.* Исследование процессов прецизионного формообразования сферических элементов узлов гиросприборов с использованием прогрессивных методов выполнения неразъемных соединений: Дис. канд. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 146 с.
2. *Агроскин Б. Н.* и др. Сравнительная оценка электрохимического и фотохимического методов формообразования светоконтрастного рисунка на роторе бескарданного электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1996. № 3 (14).
3. *Валетов В. А., Мусалимов В. М.* Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: ПИМаш, 2006. С. 101—168.
4. *Валетов В. А.* Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. Л.: ЛИТМО, 1989. 100 с.
5. Патент РФ № 2498224. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / *О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, Б. Е. Ландау, А. Я. Бузык, В. П. Вейко, В. А. Валетов.* 10.11.2013.

Сведения об авторах

- Ольга Сергеевна Юльметова** — канд. техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Сергей Дмитриевич Третьяков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: tretiserge@mail.ru
- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: a_sch@gtn.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Юльметова О. С., Третьяков С. Д., Валетов В. А., Щербак А. Г. Разработка методик определения шероховатости на функциональные свойства узлов гиросприборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 278—282.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ESTIMATING THE EFFECT OF ROUGHNESS ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF GYROSCOPE COMPONENTS**O. S. Yulmetova¹, S. D. Tretyakov², V. A. Valetov², A. G. Scherbak¹**¹ Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint Petersburg, Russia² ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valetov.v@mail.ru

Results of experimental study of the effect of component surface roughness on optical and dynamic properties of gyroscope rotors are presented. Employment of graphical criteria for roughness estimation makes it possible to apply the results to series production.

Keywords: contrast, roughness, non-parametric criteria.

Data on authors

- Olga S. Yulmetova** — PhD; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: olga@yulmetova.ru
Sergey D. Tretyakov — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: tretiserge@mail.ru
Vyacheslav A. Valetov — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru
Alexander G. Scherbak — Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: a_sch@gtn.ru

Reference for citation: Yulmetova O. S., Tretyakov S. D., Valetov V. A., Scherbak A. G. Development of methods for estimating the effect of roughness on functional properties of gyroscope components // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 278—282 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-278-282

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЯ

А. В. ЛЮБИВЫЙ¹, Р. М. ИСАЕВ²

¹ ОАО „Камчатский гидрофизический институт“, 197183, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

² ОАО „Техприбор“, 196128, Санкт-Петербург, Россия

Триботехнические свойства изделия, на применении которых основана работа многих видов муфт, зависят от различных факторов. Рассмотрено влияние микрогеометрии поверхностного слоя деталей, входящих в пару трения, на силу трения, возникающую между ними. Сделан вывод о необходимости оптимизации микрогеометрии с применением непараметрических критериев оценки.

Ключевые слова: микрогеометрия, триботехнические свойства, момент сопротивления вращению, тормозная муфта.

При проектировании гироскопических систем для удержания элементов оси вращения в отсутствие электропитания используют множество конструктивных решений, в частности, применяют механические фиксаторы, электромагнитные арретеры, электромагнитные тормозные муфты и др. Электромагнитная тормозная муфта обладает рядом преимуществ: небольшие габариты, маленькая потребляемая мощность, устойчивость к внешним воздействующим факторам.

Улучшение тех или иных эксплуатационных свойств на этапе проектирования систем гиросtabilизации классическими методами зачастую связано с огромными затратами. Например, повышение точности изготавливаемых деталей требует применения дорогостоящего оборудования, специального технологического оснащения и режущего инструмента. Эти факторы могут привести к существенному увеличению себестоимости, а в ряде случаев даже к нерентабельности производства изделия. Одним из методов улучшения эксплуатационных свойств можно назвать оптимизацию микрогеометрии функциональных поверхностей изделий. Но существующий стандарт на шероховатость поверхностей практически исключает такую возможность.

В 1975 г. был предложен принципиально новый метод оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей, названный непараметрическим [1]. В исследовании, посвященном этому методу, детально проработаны все аспекты проблемы оптимизации микрогеометрии: от нормирования до технологического обеспечения и контроля.

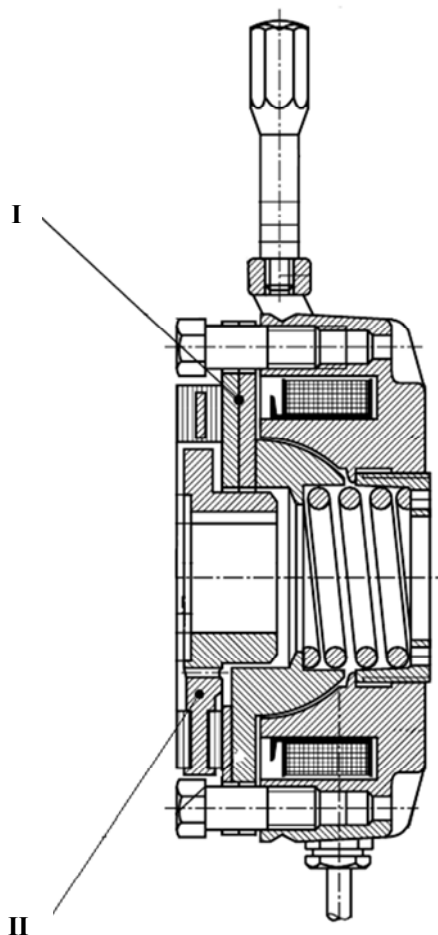
В настоящей работе рассматривается влияние микрогеометрии функциональных поверхностей на силу трения скольжения, возникающую в паре трения „тормозной диск—фланец“ при работе тормозной муфты. Для оценки характеристик поверхностного слоя и контроля микрогеометрии функциональных поверхностей в исследуемой паре трения применен непараметрический метод.

Под силой трения скольжения будем понимать силу, возникающую между соприкасающимися телами при работе узла прибора. Трение называют сухим, если между деталями в паре трения отсутствует смазывающее вещество; на таком принципе основана работа тормозной электромагнитной муфты COMBISTOR (см. рисунок).

Одним из ключевых параметров тормозной муфты является величина момента сопротивления вращению ($M_{\text{сопр}}$), при приложении которого происходит разарретирование муфты.

Так как нежелательное срабатывание муфты может привести к поломке прибора, становится актуальной задача нормирования, обеспечения и контроля данной величины.

В рамках исследования были проведены измерения момента сопротивления тормозной электромагнитной муфты COMBISTOR в нормальных климатических условиях с помощью электронного динамометра *Electronic Digital Scale AR835*. Получены следующие результаты измерений: испытание 1 — $M_{\text{сопр}} = 0,55$; 2 — $0,62$; 3 — $0,7$; 4 — $0,62$; 5 — $0,65$ Нм (согласно ТУ, должно быть $M_{\text{сопр}} = 0,65$ Нм).



Проанализировав данные измерений момента сопротивления вращению в нормальных климатических условиях, можно увидеть, что результаты первого, второго и четвертого испытаний $M_{\text{сопр}}$ не соответствуют параметру муфты, который задан в технических условиях на прибор, что делает невозможным эксплуатацию муфты и соответственно всего прибора.

По результатам исследования был сделан вывод о необходимости улучшения этого эксплуатационного свойства электромагнитной тормозной муфты.

Можно утверждать, что величина момента сопротивления вращению зависит от триботехнических свойств элементов данного изделия. Согласно ГОСТ Р 50740, триботехнические свойства изделий характеризуют контактное взаимодействие твердых тел при их перемещении относительно друг друга и зависят от свойств конструкционных материалов. В свою очередь, триботехнические свойства существенно зависят от микрогеометрии контактирующих поверхностей.

Из изложенного материала можно сделать вывод о необходимости оптимизации, нормирования и контроля микрогеометрии деталей в паре трения „тормозной диск—фланец“ с использованием непараметрического метода оценки шероховатости, что позволит получить

необходимую величину момента сопротивления вращению тормозной электромагнитной муфты и повысить надежность работы узла прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валетов В. А., Третьяков С. Д. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей. СПб, 2005.
2. Косилова А. Г., Мещерякова Р. К. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб, 2006.
4. Михайлов Ю. К., Иванов А. Ю. Муфты с неметаллическими упругими элементами. Л., 1987.

Сведения об авторах

- Андрей Валентинович Любивый** — ОАО „КГФИ“; инженер-разработчик; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант;
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com
- Расим Мирмагмудович Исаев** — ОАО „Техприбор“; инженер; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант; E-mail: ras_man@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Любивый А. В., Исаев Р. М. Исследование влияния микрогеометрии поверхности деталей на функциональные свойства изделия // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 283—285.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COMPONENT SURFACE MICROGEOMETRY ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF PRODUCTS

A. V. Lubiviy¹, R. M. Isaev²

¹ JSC „KGF I“, 197183, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

² JSC „Tehpribor“, 196128, Saint Petersburg, Russia

The effects of surface microgeometry of friction pair components on the friction force between them are considered. A conclusion on necessity of the surface microrelief optimization with the use of non-parametric estimating is made.

Keywords: microgeometry, tribological properties, antitorque moment, brake coupling.

Data on authors

- Andrey V. Lubiviy** — JSC „KGF I“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: lubiviyandrey@gmail.com
- Rasim M. Isaev** — JSC „Tehpribor“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: ras_man@mail.ru

Reference for citation: Lubiviy A. V., Isaev R. M. Investigation of the effect of component surface microgeometry on functional properties of products // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 283—285 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-283-285

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЛУЧШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТОРМОЗНЫХ МУФТ

А. В. ЛЮБИВЫЙ¹, Р. М. ИСАЕВ²

¹ ОАО „Камчатский гидрофизический институт“, 197183, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

² ОАО „Техприбор“, 196128, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены способы улучшения функциональных свойств тормозной муфты, в частности, момента удержания. Результаты подтверждают возможность улучшения функциональных свойств муфты за счет оптимизации микрогеометрии деталей конструкции.

Ключевые слова: микрогеометрия, момент удержания, тормозная муфта, пара трения.

Применение электромагнитной тормозной муфты приводов авиационных систем обусловлено оптимальным сочетанием массогабаритных и прочностных характеристик арретиров такого типа. Момент удержания муфт данного типа обеспечивается как величиной силы сухого трения в паре „диск муфты—ответная деталь“, так и усилием пружины. Тормозное усилие, формируемое пружинной, снимается электромагнитной силой при подаче электропитания. В двигателестроении такие муфты используются для остановки вращающихся деталей либо для удержания вала в определенной позиции.

В настоящей работе исследуются возможности улучшения функциональных свойств электромагнитной тормозной муфты COMBISTOP [1], которая применяется в приводе двухосного управляемого гиросtabilизатора, обеспечивая фиксирование оси вращения прибора при отсутствии электропитания.

Основным функциональным параметром данной муфты является момент удержания, величина которого зависит от силы сухого трения между деталями, входящими в пару трения. В приводе пару трения образуют диск и фланец.

В рамках исследования с помощью электронного динамометра *Electronic Digital Scale AR835* были проведены измерения силы удержания муфты $F_{уд}$ в нормальных климатических условиях, а также в условиях воздействия пониженной и повышенной температуры среды.

Величина момента удержания $M_{уд}$ была вычислена по формуле:

$$M_{уд} = F_{уд}h,$$

где h — плечо приложения силы, м.

Согласно результатам вычислений, момент удержания изменяется в диапазоне 0,55—0,7 Нм при заданном ТУ >0,65 Нм.

По результатам проведенного исследования было выдвинуто предположение о корреляции величины момента удержания муфты и микрогеометрии функциональной поверхности детали „фланец“.

В подтверждение зависимости момента удержания муфты от величины силы трения в паре трения „диск—фланец“ из алюминия Д16Т были изготовлены два фланца (см. рисунок)

с различной микрогеометрией функциональных поверхностей и проведена серия экспериментов по определению момента удержания муфты.



Результаты измерения момента сопротивления подтвердили зависимость момента удержания тормозной муфты от микрогеометрии функциональной поверхности фланца: момент сопротивления муфты повысился с применением фланца 2.

Для нахождения лучшей исходной микрогеометрии необходимо провести экспериментальные исследования, а это возможно сделать только с использованием графических критериев оценки и контроля микрогеометрии [1, 2], что позволит получить необходимую величину момента удержания тормозной электромагнитной муфты и повысить надежность работы узла прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любивый А. В., Исаев Р. М. Исследование влияния микрогеометрии поверхности деталей на функциональные свойства изделия // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 283—285.
2. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб, 2006.
3. Валетов В. А., Иванов А. Ю. Непараметрический подход к оценке качества изделий // Металлообработка. 2010. № 6. С. 55—59.
4. Михайлов Ю. К., Иванов А. Ю. Муфты с неметаллическими упругими элементами. Л., 1987.
5. Поляков В. С. Муфты. М., 1979.

Сведения об авторах

- Андрей Валентинович Любивый** — ОАО „КГФИ“; инженер-разработчик; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант;
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com
- Расим Мирмагмудович Исаев** — ОАО „Техприбор“; инженер; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант; E-mail: ras_man@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Любивый А. В., Исаев Р. М. Исследование возможностей улучшения функциональных свойств тормозных муфт // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 286—288.

INVESTIGATION OF POSSIBILITIES TO IMPROVE FUNCTIONAL PROPERTIES OF BRAKE COUPLING**A. V. Lubiviy¹, R. M. Isaev²**¹ JSC „KGFI“, 197183, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com² JSC „Tehpribor“, 196128, Saint Petersburg, Russia

The effect of microgeometry of the surface layer on functional properties of brake coupling is discussed. Potentialities of optimization of surface microgeometry of the components are confirmed.

Keywords: microgeometry, moment of stability, brake coupling, friction pair.

Data on authors

Andrey V. Lubiviy — JSC „KGFI“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

Rasim M. Isaev — JSC „Tehpribor“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: ras_man@mail.ru

Reference for citation: Lubiviy A. V., Isaev R. M. Possibility of increasing functional properties brake coupling // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 286—288 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-286-288

МЕТОД СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Б. С. ПАДУН, К. В. КИПРИЯНОВ, А. С. ШЕМАНЯЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kinnder@mail.ru*

Рассмотрены подходы к представлению технологических процессов в виде ориентированных графов и системы проектирования на их основе. Выявлены проблемы и ограничения этих подходов, для их преодоления разработан метод синтеза на основе линейных графов. Представлены общие положения метода, приведены алгоритм его использования и рекомендации по применению метода для проектирования инструментальной системы синтеза технологических процессов.

Ключевые слова: автоматизация, технологический процесс, алгоритм синтеза, линейный граф.

Задача создания инструментальных средств синтеза технологических процессов (ТП) является центральной в проблеме разработки САПР технологической подготовки производства. В работе [1] приведены классификация, формальные описания моделей и схемы реализации методов синтеза ТП: с использованием ТП-аналогов, с использованием элементов-аналогов и без аналогов. Предложенные схемы проектирования методов определяют состав компонентов программной системы синтеза ТП, но не дают представления об использовании математических моделей при реализации компонента „синтез структуры ТП“.

В работе [2] предложен вариант алгоритмического представления процедуры синтеза решений, которая успешно применялась при проектировании наладки револьверной головки токарно-револьверного станка. В основу этой процедуры положен метод синтеза с использованием элементов-аналогов. В качестве типовых элементов-аналогов использовались блочные переходы. Но разработанную в [2] программную реализацию процедур нельзя считать инструментальной, так как она содержит специфичные оригинальные компоненты. Поэтому работы по дальнейшей формализации методов синтеза и разработке соответствующих инструментальных средств являются актуальными.

В настоящей статье представлен разработанный метод синтеза, позволяющий создать инструментальную систему проектирования ТП из элементов-аналогов (типовых компонентов) и сформировать базу знаний.

Определим понятие „технологический процесс“ как систему действий, которые выполняются на ресурсах технологической системы при изготовлении изделия. Это определение является развитием определений, которые представлены в работах [3—5]. В рамках настоящей работы актуален подход к ТП с позиций формализации решения задачи проектирования процесса.

При проектировании ТП широко используется теория графов. С помощью ориентированных графов обычно задается временная последовательность изготовления изделий.

Например, множество вершин — это множество состояний изделия в процессе изготовления, а множество дуг — это множество операций изготовления изделия. Также при построении ориентированных графов используется подход, согласно которому множество вершин — это множество технологических действий D , выполняемых при изготовлении изделий, а множество дуг G описывает временную последовательность действий [2]. В нашем случае более перспективным вариантом является второй. Следовательно, $t = (D, G)$, где t — это ТП.

В тех случаях, когда требуется задать на графе одновременно несколько правил взаимодействия, например: временные, пространственные, качественные и т.д., то используются мультиграфы. В этом случае множество дуг — это множество непересекающихся подмножеств дуг: $G = \{G_1, G_2, G_m\}$. Каждое подмножество дуг задает правила взаимодействия действий по одному показателю. Нетрудно заметить, что два технологических действия при изготовлении изделия в общем случае должны согласовываться по разным показателям.

Современные технологические системы — это программно управляемое многокомпонентное оборудование, где каждый компонент может работать автономно, пример: автоматизированная линия сборки [6], обрабатывающий центр Willemin Macodel 508MT. Для проектирования процессов и управляющих программ целесообразно применять типовые части ТП и макросы, что предполагает синтез решений из элементов-аналогов. В общем случае каждый элемент-аналог (технологическое действие) описывается множеством свойств и каждое свойство задается множеством значений.

В работе [1] представлены инвариантная схема и формальное представление синтеза ТП с применением элементов-аналогов. В схему включены компоненты классификации изделия к определенному классу (Γ_{ki}), выбора элементов-аналогов (Γ_{ai}), синтеза ТП (S_i), оценки эффективности элементов-аналогов (K_i) и ТП, параметризации ТП (N_i):

$$L K_i N_i S_i \Gamma_{ai} \Gamma_{ki} u = t_{i+1},$$

где t_{i+1} — ТП ($i+1$)-го уровня декомпозиции (например, технологический маршрут, технологическая операция и т.д.), u — изделие, L — диалоговый оператор.

При построении программной системы все компоненты были реализованы в виде инструментальных моделей, кроме компонентов синтеза, которые подключались через унифицированный информационный интерфейс к программной системе как оригинальные. Компоненты синтеза включали инвариантные процедуры, полностью унифицировать которые, используя рассмотренные выше подходы, нельзя.

Предлагается реализовать процедуру синтеза ТП, используя линейные графы, в которых граф представляет собой объединение многосвязных элементов. Многосвязный элемент — это вершина графа с полусвязями, которые инцидентны элементу с одной стороны [7]. По полусвязям элемент может взаимодействовать с другими элементами и средой. Связи в графе образуются при объединении пар полусвязей одного наименования. В линейном графе каждая вершина соответствует компоненту ТП i -го уровня декомпозиции, а дуга — причинно-следственной связи. Полученный линейный граф является моделью ТП ($i + 1$)-го уровня декомпозиции.

Будем называть часть линейного графа, в которой не все полусвязи соединены как связи, фрагментом линейного графа. Нетрудно заметить, что элементы-аналоги (компоненты), из которых синтезируется ТП, являются фрагментами линейного графа.

Связи между элементами ТП, а следовательно и полусвязи, многообразны и определяются применяемым технологическим оборудованием, технологической оснасткой, методами и способами изготовления изделий, организацией производства. При проектировании любого ТП используются временные, энергетические, пространственные и качественные полусвязи; в свою очередь, например, энергетические полусвязи могут быть силовыми, тепловыми и т.п.

Каждая полусвязь описывается именем, типом и значениями показателя, а также именем правила. Будем различать качественный и количественный показатели. Качественный

задается конкретным значением или множеством допустимых значений, количественный — конкретным числом либо интервалом чисел, либо граничным значением. По правилу полусвязи одного наименования разных элементов-аналогов соединяются в связь. Правила соединения позволяют не только определить возможность образования связей, но и сформировать новые значения показателей. После объединения полусвязей могут уточняться свойства технологических действий, вошедшие в сформированный фрагмент линейного графа на данном этапе.

Многосвязные элементы делятся на такие категории, как усилие, поток, момент, перемещение, емкость, инерционность, сопротивление, трансформатор, гиратор, нулевой элемент, единичный узел.

Под усилием, которое должно передаваться на исполнительные органы технологического оборудования, понимается сила или температура, а под потоком — скорость изменения характеристики. Момент — это количество движения; перемещение — механический сдвиг; емкость — аккумуляция потенциальной энергии, или энергии упругости, или температуры; инерционность — аккумуляция кинетической энергии; сопротивление — механические потери (например, трение) или потери температуры (например, взаимодействие с внешней средой).

Трансформатор и гиратор — это двусвязные элементы, которые сохраняют мощность или температуру. Нулевой и единичный узлы — трех- и более связные, нулевой узел суммирует энергию, а единичный — реакцию на энергетическое воздействие.

В инструментальной системе „Синтез“ фрагменты линейного графа хранятся в базе данных и могут рассматриваться как входные данные. Процесс проектирования ТП ведется по заданию, содержащему описание изготавливаемого изделия и заготовки. Выходными данными является ТП.

Метод включает следующие этапы.

Подготовительный этап. Формируется база элементов-аналогов. Для каждого элемента-аналога определяются технологическое действие (переход, операция, маршрут), а также состав и состояние технологической системы до и после ее выполнения. Также указывается переходная функция, осуществляющая расчет параметров технологического действия и характеристики результирующего состояния.

Постановка задачи на проектирование. На этом этапе описываются начальное и конечное состояния технологической системы. Начальное состояние должно быть описано полностью, т.е. перечислены все входящие объекты, с указанием количественных и качественных характеристик. Конечное состояние описывается так, чтобы можно было определить, достигнуто оно при проектировании или нет.

Проектирование. На этом этапе осуществляются формирование ТП и определение состояний технологической системы на основе базы элементов-аналогов. Формирование последовательности осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) поиск элементов-аналогов;
- 2) добавление найденных элементов в последовательность;
- 3) расчет параметров технологических действий и результирующих состояний технологической системы.

Если какая-то полусвязь сформированного фрагмента на промежуточном этапе не связывается ни с одной родственной полусвязью выбранных элементов-аналогов, то рассматриваются следующие варианты: диалог с пользователем, ввод промежуточного элемента-аналога для согласования связей (его называют согласующим или паразитным элементом), замыкание полусвязи на окружающую среду.

Технологическое действие или их система, направленные на предмет труда, переводят его из одного состояния в другое. Технологическое действие или их система — это оператор, который применяется к конкретному состоянию предмета труда, а результат применения —

новое состояние предмета: $u_v = t_v(u_{v-1})$, где v — шаг проектирования, u_v — состояние изделия на v -м шаге, t_v — действия v -го шага;

4) выбор элемента-аналога и интегрирование его в фрагмент линейного графа предыдущего шага проектирования;

5) если текущее состояние не равно конечному, то переход к шагу 1.

Вывод решения. На этом этапе осуществляются выбор оптимального решения и вывод его в виде, удобном для предметной области. Оптимальное решение определяется по заданному критерию.

Перечисленные этапы могут выполняться отдельно друг от друга.

Заключение. Предложенный метод позволяет построить инструментальный компонент „Синтез“, который можно настраивать на решение конкретных задач за счет наполнения базы элементами-аналогами и организации базы знаний, ориентированных на определенный тип технологического оборудования. Следует отметить, что полученный линейный граф описания ТП в дальнейшем может быть использован в качестве модели для исследования и оптимизации ТП и реализующей его технологической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов С. П., Куликов Д. Д., Миляев О. Н., Падун Б. С. Технологическая подготовка гибких производственных систем. Л.: Машиностроение, 1987. 352 с.
2. Митрофанов С. П., Гульнов Ю. А., Куликов Д. Д., Падун Б. С. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. М.: Машиностроение, 1981. 287 с.
3. Чарнко Д. В. Основы проектирования поточного производства в механо-сборочных цехах. М.: Машгиз, 1957. 256 с.
4. Лебедевский М. С., Федотов А. И. Автоматизация в промышленности. Л.: Лениздат, 1976. 254 с.
5. Маталин А. А. Технология машиностроения. Л.: Машиностроение, 1985. 496 с.
6. Падун Б. С., Латышев С. М. Интегрированная система автоматизации сборки микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 34—39.
7. Применение теории графов связей в технике / Под ред. Д. Кэрнопа и Р. Розенберга. М.: Мир, 1974. 96 с.

Сведения об авторах

Борис Степанович Падун

канд. техн. наук, доцент, Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

Кирилл Васильевич Киприянов

аспирант, Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: kinnder@mail.ru

Александр Сергеевич Шеманаев

магистрант, Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: alt-64@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Падун Б. С., Киприянов К. В., Шеманаев А. С. Метод синтеза технологических процессов изготовления изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 289—293.

METHOD FOR SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PRODUCT MANUFACTURING**B. S. Padun, K. V. Kipriyanov, A. S. Shemanaev***ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kinnder@mail.ru*

Approaches to design systems based on representation of technological processes as oriented graphs are considered. Limitations and problems associated with the approach are revealed, method of synthesis based on linear graphs is developed to avoid the difficulties. General concepts of the method are formulated; an algorithm of the method application for instrumental system of synthesis of technological processes is presented.

Keywords: automation, technological process, algorithm of synthesis, linear graph.

Data on authors**Boris S. Padun**

PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

Kirill V. Kipriyanov

Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: kinnder@mail.ru

Alexander S. Shemanaev

Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: alt-64@mail.ru

Reference for citation: *Padun B. S., Kipriyanov K. V., Shemanaev A. S. Method for synthesis of technological processes of product manufacturing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 289—293 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-289-293

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ МИКРОФРЕЗЕРОВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМ-СИСТЕМЫ VERICUT

Н. С. ВАСИЛЬЕВ, К. П. ПОМПЕЕВ, О. С. ТИМОФЕЕВА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kirpom@rambler.ru*

Описываются методы оптимизации управляющей программы при ее верификации в среде САМ-системы VERICUT. Оптимизация управляющей программы происходит за счет разбиения траектории движения инструмента на участки, для каждого из которых определяются режимы резания. Рассмотрены способы оптимизации управляющих программ. Результаты апробации выбранного способа оптимизации микрофрезерования на станке Primacon PFM 24 Ngd показали, что машинное время сократилось на 10 %.

Ключевые слова: VERICUT, верификация, управляющая программа, оптимизация, микрообработка, инструмент, фрезерование.

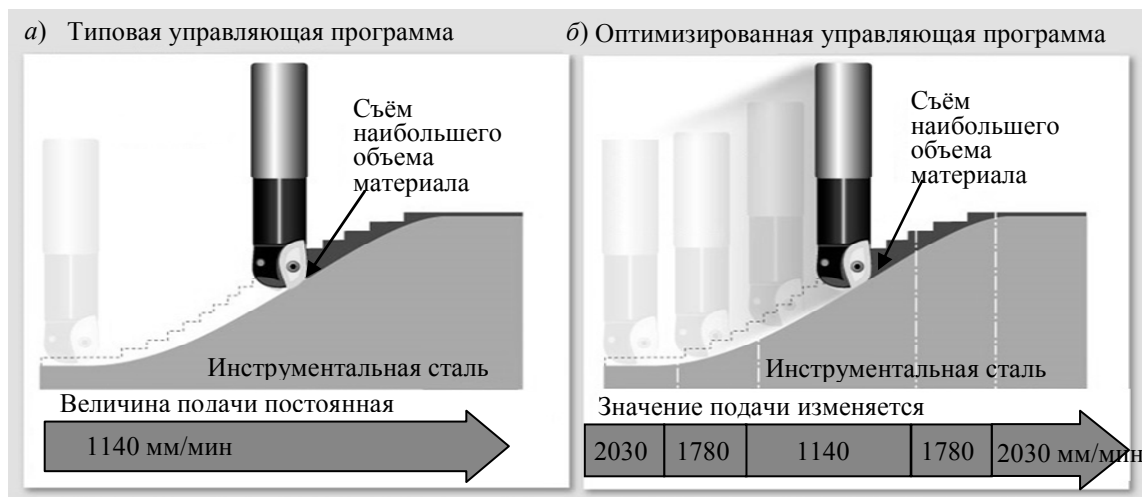
При обработке заготовок на станках с числовым программным управлением возникают различные задачи, связанные с проверкой и оптимизацией управляющих программ (УП). Это происходит вследствие того, что число кадров в программе достаточно велико (десятки—сотни тысяч) и человек физически не в состоянии отследить все ошибки, а тем более как-либо оптимизировать управляющую программу. Однако оптимизация программы необходима для снижения машинного времени и повышения производительности обработки. В условиях серийного производства от затрат машинного времени напрямую зависят экономические показатели предприятия [1].

Одним из способов сокращения машинного времени является управление режимами резания [2, 3]. Модуль OptiPath системы VERICUT предназначен для оптимизации предварительно сгенерированной УП, при этом используются электронно-кинематическая модель станка, данные о применяемом режущем инструменте и 3D-модели заготовки, которая должна быть получена в результате обработки. Оптимизируемая УП генерируется средствами постпроцессора либо составляется вручную с использованием пульта устройства числового программного управления станком. Модуль отслеживает объем материала, виртуально удаляемого с заготовки в соответствии с кадрами исходной УП. При изменении объема удаляемого материала величина подачи может автоматически изменяться согласно внутреннему алгоритму работы системы. В случае увеличения объема снимаемого материала подача уменьшается, и наоборот. Благодаря этому сохраняется постоянной нагрузка на инструмент в процессе резания материала. Несмотря на это, как показывает практика, технолог-программист задает минимальное значение подачи, чтобы избежать поломки инструмента. Однако более рациональным решением будет применение разных значений рабочих подач для удаления различных объемов материала при обработке заготовки.

В общем случае модуль функционирует следующим образом. На основе данных об объеме снимаемого материала, полученных с помощью УП, модуль разбивает исходную траекторию режущего инструмента (см. рисунок, *а*) на отрезки (см. рисунок, *б*) и на каждом отрезке изменяет значение подачи на оптимальное для текущих условий резания.

При этом оптимизация управляющей программы в САМ-системе VERICUT проводится модулем OptiPath в следующей последовательности. Сначала задаются исходные данные для расчета, например, рекомендуемые режимы резания, которые можно взять из каталога режущего инст-

румента. Далее модуль автоматически соотносит эти значения с параметрами предстоящей обработки, например, с количеством зубьев фрезы, мощностью шпинделя, толщиной стружки, объемом снимаемого материала и др. На основе этих данных, а также информации о текущем объеме снимаемого материала в 3D-сечении, модуль определяет наилучшие подачи для каждого отрезка траектории. Модуль также учитывает ключевые параметры обработки: глубину и ширину резания, объем снимаемого материала, подачу входа в материал, износ инструмента, подачу в углах.



После этого модуль из исходной генерирует новую управляющую программу, в которую добавляются новые кадры, описывающие движение инструмента на полученных отрезках, и измененные значения подачи. При этом разбиение рабочих участков траектории на отрезки не приводит к изменению общей траектории движения инструмента на этих участках.

Одним из способов оптимизации является оптимизация управляющей программы по времени обработки. Например, в случае многопозиционного изготовления деталей на многокоординатном оборудовании применение функции оптимизации резания „по воздуху“ (движение инструмента на рабочей подаче без снятия материала) обеспечивает сокращение времени на 5—10 % (внутренние алгоритмы САМ-системы не позволяют отслеживать возникновение таких ситуаций).

Следующий способ — оптимизация подходов режущего инструмента к заготовке и отходов от нее за счет расчета длины участков торможения или разгона инструмента.

Необходимость использования этих способов оптимизации УП определяется несовершенством алгоритмов САМ-систем по созданию траектории движения инструмента, а также невозможностью учета технологом-программистом потенциальных нестандартных ситуаций.

Таким образом, модуль OptiPath обеспечивает создание УП с оптимизированными режимами резания без изменения основной логики движения инструмента.

Для оценки минимизации машинного времени с помощью модуля OptiPath САМ-системы VERICUT была создана кинематическая модель пятикоординатного станка Primacon PFM 24 NGD. Одним из актуальных направлений развития приборостроения является миниатюризация изделий и их деталей, а также деталей технологической оснастки [4, 5], для изготовления которых все шире применяется микрофрезерование и используются подобные прецизионные станки. Поэтому на кинематической модели Primacon PFM 24 NGD был опробован предлагаемый метод оптимизации по объему снимаемой стружки.

В результате работы УП было достигнуто требуемое качество детали, обеспечены сохранность и целостность инструмента, на который действовала постоянная режущая сила. При этом машинное время было снижено примерно на 10—15 % [6].

Таким образом, использование САМ-системы VERICUT позволяет для любого станка с ЧПУ, в том числе Primacon PFM 24 NGD, оптимизировать управляющую программу и, как следствие, снизить машинное время производства детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб: Компьютербург, 2003.
2. Яблочников Е. И. Методологические основы построения АСТПП. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
3. Яблочников Е. И., Куликов Д. Д., Молочник В. И. Моделирование приборов, систем и производственных процессов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
4. Боденхаузен Й. В., Мюллер В. Новые технологии и средства микрофрезерования // САПР и Графика. 2005. № 8.
5. Koch O., Wolf A., Ehrfeld W. Mikrofunkenerosion im Formenbau. 1. Anwender-Fachtagung, Mikrosystemtechnik/ Ultrapräzisionsfertigung, Dornbirn (A). 2000. März.
6. Васильев Н. С. Оптимизация микрофрезерования с использованием САМ-системы VERICUT // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2013.

Сведения об авторах

- Никита Сергеевич Васильев** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: gross101@rambler.ru
- Кирилл Павлович Помпеев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: kirpom@rambler.ru
- Ольга Сергеевна Тимофеева** — студентка; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: olga2957869@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Васильев Н. С., Помпеев К. П., Тимофеева О. С. Оптимизация параметров обработки микрофрезерованием с использованием САМ-системы VERICUT // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 294—296.

OPTIMIZATION OF MICROMILLING PROCESS PARAMETERS WITH THE USE OF CAM-SYSTEM VERICUT

N. S. Vasiliev, K. P. Pompeev, O. S. Timofeeva

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kirpom@rambler.ru

Methods of control program optimization during its verification in the CAM-system VERICUT environment are described. The optimization is achieved through partitioning of the tool path into segments and determination of cutting mode for each of the segments. Results of testing of the chosen method of optimization of micromilling with Primacon PFM 24 Ngd machine are reported to demonstrate a 10% reduction in processing time.

Keywords: VERICUT, verification, NC program, optimization, micromilling, tool, mill.

Data on authors

- Nikita S. Vasiliev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: gross101@rambler.ru
- Kirill P. Pompeev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: kirpom@rambler.ru
- Olga S. Timofeeva** — Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: olga2957869@mail.ru

Reference for citation: Vasiliev N. S., Pompeev K. P., Timofeeva O. S. Optimization of micromilling process parameters with the use of CAM-system VERICUT // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 294—296 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-294-296

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА С СИСТЕМОЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ДАВЛЕНИЯ, СОДЕРЖАЩЕЙ РАЗГРУЖЕННЫЙ КЛАПАН

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190008, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru*

Рассматриваются роль гидродинамических стендов (ГДС) в технологической организации производства пусковых систем подводных роботов и проблемы их проектирования. Для решения задачи повышения давления внутри ГДС в процессе срабатывания испытываемой пусковой системы предлагается конструкция стенда, оснащенного системой поддержания давления, содержащей разгруженный противодавлением клапан. Представлены расчетная схема разработанного варианта стенда и математические модели, описывающие с использованием уравнений состояния идеального газа и уравнений Ван-дер-Ваальса для реального газа газодинамические процессы в воздушной полости ГДС, а также параметры работы клапана в ходе срабатывания пусковой системы. Приведены результаты компьютерного моделирования работы ГДС. Показано, что при включении в состав ГДС системы поддержания давления с разгруженным клапаном объем воздушной полости стенда может быть уменьшен по отношению к используемому в настоящее время техническим решениям ГДС не менее чем в пять раз при сохранении заданного уровня изменения давления в воздушной полости стенда при работе пусковой системы.

Ключевые слова: *подводные роботы, испытания, гидродинамический стенд, оценка параметров стенда, математическое моделирование.*

Сегодня с целью освоения Мирового океана стремительно развивается подводная робототехника, создаются новые подводные роботы (ПР) различного назначения. Часть подобных устройств ориентирована на функционирование в труднодоступных для надводных носителей акваториях, что делает актуальной разработку пусковых систем, предназначенных для интеграции роботов с подводными носителями, осуществляющими принудительное отделение ПР за счет приложения кратковременного силового импульса [1—6]. Создание пусковых систем требует большого количества испытаний и, как следствие, специализированного оборудования — гидродинамических стендов (ГДС), способных обеспечить проведение всего комплекса экспериментальных работ в условиях производственных помещений [7—9].

Основная трудность при проектировании ГДС обусловлена тем, что пуск ПР осуществляется внутрь замкнутого объема испытательной камеры стенда, давление в которой повышается, и это приводит к ухудшению контролируемых характеристик работы пускового устройства по отношению к натурным условиям. В настоящее время задача поддержания давления в ГДС в процессе пуска ПР решается за счет увеличения объема воздушной полости стенда (реальное отношение последнего к водоизмещению ПР колеблется в пределах 20—40). Обеспечить совпадение характеристик работы пускового устройства в условиях ГДС и натурных испытаний также можно, используя так называемый пристрелочный коэффициент (в этом случае для каждой глубины пуска уменьшается установочное давление в ГДС перед пуском ПР): при этом давление в стенде повышается, превосходя имитируемое гидростатическое давление, но работа, совершаемая пусковым устройством, является близкой по величине к

работе пускового устройства в условиях постоянного внешнего давления. Недостатком способа является относительно невысокая наглядность испытаний.

В рамках существующих подходов создание ГДС с малым объемом воздушных полостей невозможно. Для решения этой задачи требуется включение в состав стенда дополнительной системы, которая может обеспечить поддержание исходного давления в воздушной полости ГДС в процессе пуска ПР. При участии автора настоящей статьи разработан метод поддержания постоянства давления в воздушной полости ГДС при комплексных испытаниях пусковых устройств малогабаритных ПР, позволяющий создавать ГДС с малыми объемами воздушных полостей [10].

Предложенная схема ГДС позволяет обеспечить поддержание имитируемого внешнего давления за счет включения в состав ГДС выпускного клапана, разгруженного противодавлением, равным по величине давлению в воздушной полости ГДС до момента пуска ПР. Для уменьшения инерционности клапан оснащен возвратной пружиной, а его вес компенсируется усилием разгрузочной пружины. В работе представлено математическое описание газодинамических процессов в воздушной полости ГДС и параметров работы клапана в процессе пуска ПР при использовании уравнений Ван-дер-Ваальса для реального газа и уравнения состояния идеального газа.

Расчетная схема для представленного варианта ГДС приведена на рис. 1.

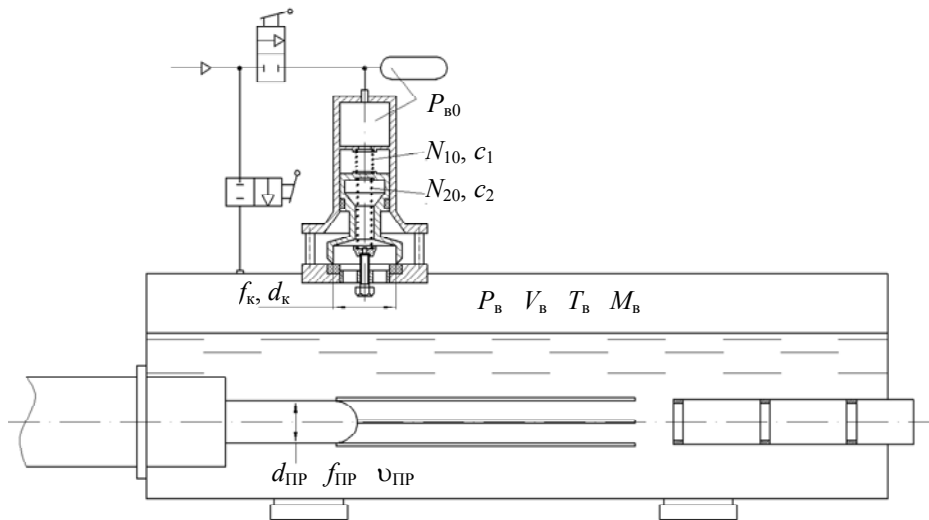


Рис. 1

Давление воздуха $P_{в}$ в воздушной полости ГДС до момента пуска ПР равно давлению $P_{в0}$, воздействующему на работу клапана. Разгрузочная пружина имеет установочное усилие N_{20} и жесткость c_2 , а возвратная — установочное усилие N_{10} и жесткость c_1 . Повышение начального давления в стенде компенсируется сбросом из воздушной полости части массы газа $M_{в}$ через проходное сечение клапана площадью $f_{к}$.

В случае использования модели идеального газа работа ГДС может быть описана следующим образом.

Изменение объема $V_{в}$ воздушной полости ГДС ($\text{м}^3/\text{с}$) при пуске ПР определяется так:

$$\frac{dV_{в}}{dt} = -(f_{ПР}v_{ПР} + f_{к3}v_{к3}) \approx -1,25f_{ПР}v_{ПР}, \quad (1)$$

где $f_{ПР}$ — площадь поперечного сечения ПР, м^2 ; $v_{ПР}$ — скорость движения ПР, определяющаяся в каждый момент времени с помощью математической модели работы пускового устройства, $\text{м}/\text{с}$; $f_{к3}$ — площадь поперечного сечения кольцевого зазора в обтюрации пускового устройства, м^2 ; $v_{к3}$ — скорость движения жидкости в кольцевом зазоре пускового устройства, $\text{м}/\text{с}$.

Изменение давления P_B в воздушной полости описывается формулой:

$$\frac{dP_B}{dt} = -\frac{k}{V_B} \left(P_B \frac{dV_B}{dt} - RT_B \frac{dM_B}{dt} \right), \quad (2)$$

где $\frac{dM_B}{dt}$ — изменение массы газа в воздушной полости за счет расхода воздуха через клапан, кг/с; $R = 287,1$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $k=1,41$ — показатель адиабаты; T_B — температура в демпфирующей воздушной полости, К:

$$T_B = \frac{P_B V_B}{R M_B}. \quad (3)$$

Здесь значение M_B задается перед началом вычислений исходя из начальных объема полости и плотности газа ρ_B (которая, в свою очередь, определяется через начальные давление и температуру из табличных данных [11]).

Баланс сил, действующих на клапан, описывается как:

$$F_K = -g m_K - N_{10} - c_1 y + N_{20} + c_2 y + f_K (P_B - P_{B0}) - j N_{тр}, \quad (4)$$

где m_K — масса клапана, кг; $N_{тр}$ — сила трения в клапане, Н;

$$j = \begin{cases} 1 & \text{при } v_K > 0, \\ -1 & \text{при } v_K < 0. \end{cases}$$

Сила трения в клапане выражается следующим образом:

$$N_{тр} = \mu_{тр} (P_{K0} + (P_{B0} - P_{атм})) \pi d_{упл}^2, \quad (5)$$

где $\mu_{тр}$ — коэффициент трения; $P_{K0} = 3 \cdot 10^5$ — постоянная для клапана, Па; $P_{атм}$ — атмосферное давление, Па; $d_{упл}$ — диаметр кольца уплотнения в клапане, м.

Изменение массы газа в воздушной полости определяется так:

$$\frac{dM_B}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } y = 0 \text{ и } F_K \leq 0, \\ -\mu_K \pi d_K y \frac{P_B}{\sqrt{RT_B}} q, & \end{cases} \quad (6)$$

где μ_K — коэффициент расхода воздуха через клапан; d_K — диаметр клапана, м; y — перемещение клапана, м; q — функция расхода воздуха через клапан,

$$q = \begin{cases} \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} & \text{при } \frac{P_{атм}}{P_B} < 0,528, \\ \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\left(\frac{P_{атм}}{P_B} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{атм}}{P_B} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{при } \frac{P_{атм}}{P_B} \geq 0,528. \end{cases} \quad (7)$$

Ускорение движения клапана:

$$\frac{dv_K}{dt} = \frac{F_K}{m_K}, \quad (8)$$

скорость открытия/закрытия клапана:

$$\frac{dy}{dt} = v_K. \quad (9)$$

При использовании модели Ван-дер-Ваальса для реального газа расчетная схема остается той же, что и для идеального газа. Базовые газодинамические зависимости, используемые

для построения математических моделей с использованием уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, приведены в работе [12]. Ряд параметров процесса работы ГДС определяется из выражений, действительных для модели идеального газа: изменение объема V_B воздушной полости ГДС — из (1), баланс сил, действующих на клапан, — из (4), сила трения в клапане — из (5), скорость открытия/закрытия клапана — из (9), а ускорение — из (8).

Изменение массы газа в воздушной полости определяется так:

$$\frac{dM_B}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } y = 0 \text{ и } F_K \leq 0, \\ -G, & \end{cases} \quad (10)$$

где G — расход воздуха через клапан, $\text{м}^3/\text{с}$.

Расход G из воздушной полости ГДС зависит от перепада между давлением P_B в ней и атмосферным давлением. При критическом режиме истечения параметры воздуха в выходном сечении клапана рассчитываются таким образом. Критический коэффициент сжимаемости $Z_{кр}$ определяется из следующего выражения:

$$\begin{aligned} & \frac{(2C_v + R)(C_v + R)}{C_v} \left[1 + \frac{2R}{C_v + R} \frac{b\rho_B}{1 - b\rho_B} Z_{кр} + \frac{R}{2C_v + R} \left(\frac{b\rho_B}{1 - b\rho_B} \right)^2 Z_{кр}^2 \right] Z_{кр}^{\frac{R}{C_v}} - \dots \\ & - \frac{6a\rho_B Z_{кр}}{T_B (1 - b\rho_B + b\rho_B Z_{кр})} = 2(C_v + R) + 2R \frac{b\rho_B}{1 - b\rho_B} - \frac{4a\rho_B}{T_B}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $a = 112,817$, $b = 1,053 \cdot 10^{-3}$ — константы уравнения состояния газа Ван-дер-Ваальса для воздуха; C_v — теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К); ρ_B — плотность воздуха внутри ГДС.

Критическое значение плотности газа в воздушной полости рассчитывается в соответствии с выражением

$$\rho_{кр} = \frac{\rho_B Z_{кр}}{1 - b\rho_B + b\rho_B Z_{кр}}. \quad (12)$$

Значение критической температуры вычисляется следующим образом:

$$T_{кр} = T_B Z_{кр}^{\frac{R}{C_v}}, \quad (13)$$

критического давления

$$P_{кр} = (P_B + a\rho_B^2) Z_{кр}^{\frac{R+C_v}{C_v}} - a\rho_{кр}^2. \quad (14)$$

При $P_{атм} \leq P_{кр}$ устанавливается критический режим истечения газа из воздушной полости, при котором массовый секундный расход G вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\mu_k \pi d_k \gamma \rho_B Z_{кр}}{1 - b\rho_B + b\rho_B Z_{кр}} \times \\ & \times \sqrt{RT_B \left[\frac{R + C_v}{C_v} \left(1 + \frac{b\rho_B Z_{кр}}{1 - b\rho_B} \right) Z_{кр}^{\frac{R}{C_v}} - \frac{2a\rho_B Z_{кр}}{RT_B (1 - b\rho_B + b\rho_B Z_{кр})} \right]}. \end{aligned} \quad (15)$$

Если $P_{атм} > P_{кр}$, массовый секундный расход рассчитывается согласно соотношению

$$G = \frac{\mu_k \pi d_k \gamma \rho_B Z_{\text{докр}}}{1 - b\rho_B + b\rho_B Z_{\text{докр}}} \times \sqrt{2RT_B \left[\frac{R+C_v}{R} \left(1 - Z_{\text{докр}} \frac{R}{C_v} \right) + \frac{b\rho_B}{1-b\rho_B} \left(1 - Z_{\text{докр}} \frac{R+C_v}{C_v} \right) - \frac{2a\rho_B}{RT_B(1-b\rho_B)} \left(1 - b\rho_B - \frac{\rho_B Z_{\text{докр}}}{1-b\rho_B + b\rho_B Z_{\text{докр}}} \right) \right]}, \quad (16)$$

где коэффициент сжимаемости для докритического режима истечения:

$$Z_{\text{докр}} = \frac{P_{\text{атм}}}{P_B} \frac{1 - b\rho_B}{1 - b\rho_{\text{вых}}}. \quad (17)$$

При этом $\rho_{\text{вых}}$ — плотность газа в выходном сечении клапана — определяется из выражения

$$\frac{P_B + a\rho_B^2}{P_{\text{атм}} + a\rho_{\text{вых}}^2} = \left(\frac{\rho_{\text{вых}}}{\rho_B} \frac{1 - b\rho_B}{1 - b\rho_{\text{вых}}} \right)^{\frac{R+C_v}{C_v}}. \quad (18)$$

Давление P_B в каждый момент времени вычисляется из следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dP_B}{dt} = \frac{R}{V_B C_v (1 - b\rho_B)} \left[- \left(\Pi_B + \frac{C_v}{R} \left(bP_B + \frac{R - C_v}{C_v} 2a\rho_B + 3ab\rho_B^2 \right) \right) G - \frac{dV_B}{dt} \left(P_B \frac{R+C_v}{R} + \frac{R - C_v}{R} a\rho_B^2 + \frac{C_v}{R} 2ab\rho_B^3 \right) \right]. \quad (19)$$

Удельный расход Π_B энергии может быть приравнен к изменению удельной энтальпии i_B :

$$\Pi_B = i_B = \frac{kRT_B}{k-1} + \frac{bRT_B}{V_{\text{уд}} - b} - \frac{2a}{V_{\text{уд}}}, \quad (20)$$

$V_{\text{уд}}$ — удельный объем газа внутри ГДС.

Изменение температуры в воздушной полости определяется таким образом:

$$\frac{dT_B}{dt} = \frac{1}{V_B C_v \rho_B} \left[- (\Pi_B - C_v T_B + 2a\rho_B) G - \frac{dV_B}{dt} \left(\frac{\rho_B RT_B}{1 - \rho_B b} - 2a\rho_B^2 \right) \right]. \quad (21)$$

На рис. 2 представлены результаты работы ГДС с разгруженным клапаном, полученные с использованием моделей идеального газа (2) и Ван-дер-Ваальса для реального газа (1) (объем воздушной полости ГДС $V_B = 4V_{\text{пр}}$, имитируемая глубина работы пускового устройства — 140 м).

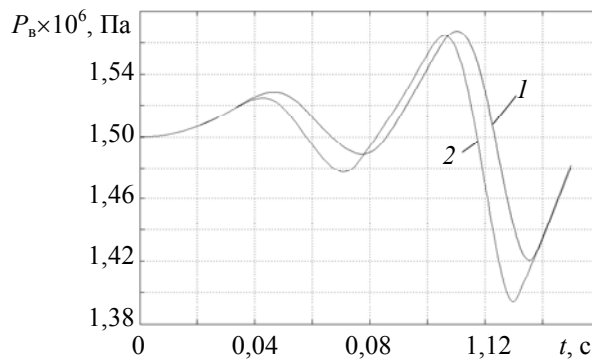


Рис. 2

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1) представленные математические модели позволяют описывать процессы, протекающие внутри ГДС в ходе пуска ПР;

2) расхождение между значениями давления, полученными с применением моделей идеального и реального газов, не превышает $0,5 \cdot 10^5$ Па в диапазоне имитируемых давлений до 4,5 МПа, поэтому при проектировании ГДС в этом диапазоне целесообразно использование модели идеального газа как более простой;

3) максимальное отклонение давления в воздушной полости от установочного в процессе пуска ПР не превышает 10 %, т.е. при прочих равных условиях ГДС рассматриваемого типа при объеме воздушной полости, равном четырем объемам испытываемого ПР, обеспечивает такие же значения изменения давления, как ГДС классической схемы с объемом воздушной полости, соответствующим 20 объемам исследуемого робота. Таким образом, при использовании разгруженного клапана объем воздушной полости ГДС может быть уменьшен по отношению к классической схеме ГДС не менее чем в пять раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 87511. Транспортно-пусковой контейнер / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. Оpubл. 10.10.2009. Бюл. № 28.
2. Патент РФ № 97506. Устройство для выпуска подводных аппаратов / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, Е. П. Красильников, П. А. Хорьков, Р. А. Урусов. Оpubл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
3. Патент РФ № 116619. Пусковое устройство для подводных аппаратов / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, Е. П. Красильников, П. А. Хорьков, Р. А. Урусов. Р.А. Оpubл. 27.05.2012. Бюл. № 15.
4. Патент РФ № 117601. Устройство для выталкивания подводных аппаратов / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, Е. П. Красильников, П. А. Хорьков, Р. А. Урусов. Оpubл. 27.06.2012. Бюл. № 18.
5. Патент РФ № 2499215. Способ отделения объекта от носителя и устройство для его осуществления / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, А. А. Масько. Оpubл. 20.11.2013. Бюл. № 32.
6. Патент РФ № 144161. Устройство для формирования скорости подводного аппарата при его отделении от носителя / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, Е. П. Красильников, П. А. Хорьков, И. Б. Молчанов, Г. С. Барышев. Оpubл. 10.08.2014. Бюл. № 22.
7. Красильников А. В., Ефимов О. И., Валетов В. А. Испытания пусковых устройств подводных роботов. СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2012. 102 с.
8. Красильников А. В. Проблемы создания средств освоения континентального шельфа Мирового океана // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 47—50.
9. Красильников А. В., Красильников Р. В. Перспективный способ комплексных стендовых испытаний пусковых устройств малогабаритных подводных аппаратов // Тр. отраслевой науч.-техн. конф. молодых специалистов МПО-МС-2013. СПб: Концерн „Морское подводное оружие — Гидроприбор“, 2014. 200 с.
10. Патент РФ № 2449254. Гидродинамический стенд / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. Оpubл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
11. Сычев В. В., Вассерман А. А., Козлов А. Д., Спиридонов Г. А., Цымарный В. А. Термодинамические свойства воздуха. М.: Изд-во стандартов, 1978. 276 с.
12. Арзуманов Ю. Л., Халатов Е. М., Чекмазов В. И., Чуканов К. П. Математические модели систем пневмоавтоматики: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 294 с.

Сведения об авторе

Антон Валентинович Красильников —

канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Красильников А. В. Математическое описание работы гидродинамического стенда с системой поддержания давления, содержащей разгруженный клапан // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 297—303.

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF OPERATION OF HYDRODYNAMIC TEST BENCH WITH
PRESSURE MAINTENANCE SYSTEM INCORPORATING AN UNLOADED VALVE**

A. V. Krasilnikov

*St. Petersburg State Marine Technical University, 190008, Saint Petersburg, Russia
E-mail: a.v.krasilnikov@mail*

The role of hydrodynamic test benches in technological organization of production of underwater robots start systems is described, problems of the test bench design are considered. A test bench equipped with pressure maintenance system incorporating an unloaded valve is developed. The test bench schematic is given, a mathematical description of the test bench operation is presented.

Keywords: underwater robots, tests, hydrodynamic test bench, assessment of the test bench parameters, mathematical modeling.

Data on author

Anton V. Krasilnikov — PhD; St. Petersburg State Marine Technical University, Research Sector of Perspective Power Installations; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Reference for citation: Krasilnikov A. V. Mathematical description of operation of hydrodynamic test bench with pressure maintenance system incorporating an unloaded valve // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 297—303 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-297-303

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕНДА ИМИТАЦИИ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ

В. А. ВАЛЕТОВ, И. Ю. ШМИГЕЛЬСКИЙ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Рассмотрены проблемы изготовления проекционного экрана стенда имитации фоноцелевой обстановки. Выбрана растровая отражающая поверхность с направленно-диффузным светоотражением. Проанализированы зависимости яркостных характеристик выбранной отражающей поверхности проекционного экрана от угла отражения светового потока к нормали поверхности. Исходя из технологии изготовления раstra определен метод охлаждения отражающей поверхности экрана, функционирующего в видимой и инфракрасной областях спектра. Разработана технология раскроя сферы для аппроксимации ее формы.

Ключевые слова: проекционный экран, растровая отражающая поверхность, спектральный коэффициент яркости, имитационный стенд фоноцелевой обстановки.

В настоящее время отечественная промышленность разрабатывает оптоэлектронные системы обнаружения объектов-целей на фоне окружающего пространства — оптические локационные станции (ОЛС). В целях отработки программного обеспечения и решения задачи применения оптических локационных станций требуется создание имитационных стендов фоноцелевой обстановки (ФЦО). При испытаниях ОЛС на имитационном стенде возможно в непрерывном режиме имитировать редкие и специальные атмосферные явления, что обеспечивает экономию значительных средств и времени по сравнению с натурными испытаниями [1]. На сегодняшний день системы имитации ФЦО выпускают лишь несколько зарубежных компаний, такие как e.sigma и barco. Перед отечественными производителями стоит задача разработки стенда имитации ФЦО.

Типовой стенд включает в себя проекторы, экран проецирования, цифровой вычислительный центр обработки информации, программное обеспечение. Создание каждой из приборных частей такого стенда представляет собой серьезную технологическую задачу, решение которой в значительной мере зависит от научно-технологического задела. Остановимся на особенностях разработки одного, очень важного и сложного элемента конструкции — его экране.

При проектировании и изготовлении экрана необходимо решать сложные конструкторско-технологические задачи, основными из которых являются:

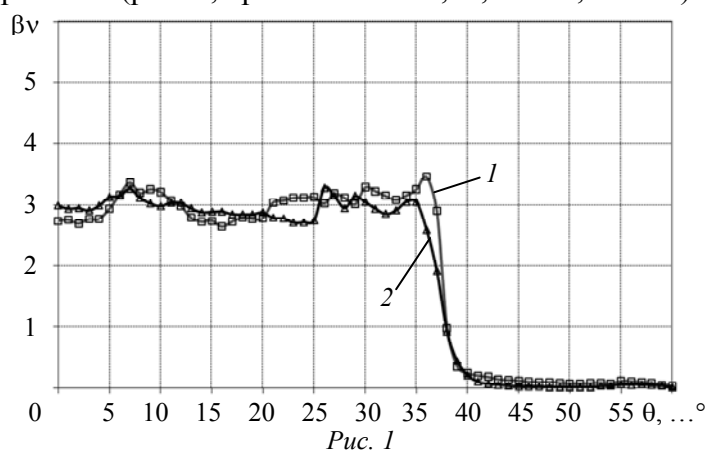
- поиск способа увеличения яркостной характеристики отражающей поверхности при минимальном искажении отраженного изображения и реализация этого способа;
- реализация формы и размера в соответствии с оптической схемой стенда;
- обеспечение отражения в необходимом спектральном диапазоне (видимый, ИК, УФ).

При решении первой задачи необходимо учесть, что окружающее ОЛС пространство характеризуется ламбертовским законом распределения яркости в угле 4π [2]. Аналогичным распределением в отраженном свете обладает поверхность, обработанная травлением или по пескоструйной технологии. Такая шероховатая поверхность имеет почти одинаковую характеристику яркости во всем диапазоне углов рассеяния от 0 до 2π , но всегда меньше единицы [3]. Существуют специальные структурированные поверхности с более узкой, чем 2π , индикатрисой рассеяния. Такие поверхности характеризуются коэффициентом яркости β_v и могут быть

или зеркально отражающими, или направленно рассеивающими. Теоретически направленно рассеивающая поверхность с равномерным распределением коэффициента яркости во всем телесном угле рассеяния — это поверхность с нанесенным на нее микрорельефом в виде зеркальных лунок сферической формы [4]. При плотном регулярном расположении этих лунок получаются сферические шестигранники. В зависимости от соотношения диаметра и глубины лунок можно реализовать заданный диапазон углов рассеяния. Чем уже индикатриса рассеяния такой поверхности, тем больше коэффициент яркости, тем ниже требования к энергетике проекторов. В нашем случае размер элемента раstra зависит от разрешающей способности ОЛС. Для отработки технологии изготовления растровой поверхности выполнен расчет параметров раstra для угла рассеяния около 35° , размер элемента раstra — 0,4 мм. По этим расчетам изготовлена матрица — рабочая поверхность инструмента.

При изготовлении образцов отражающей поверхности использовалось прессовое сканирование на станке с ЧПУ. Для обработки поверхности была опробована высокопроизводительная технология нанесения рельефа. Подобранный комплекс технологий позволяет получить оптическую поверхность, удовлетворяющую заданным параметрам, разработать один из возможных методов получения оригинала элемента экрана с требуемой оптической поверхностью и способ ее тиражирования.

На базе ГОИ им. С.И. Вавилова опытно-экспериментальным путем выбрана микрогеометрия отражающей поверхности с равномерным (разброс по коэффициенту яркости $\beta_v \sim 10\%$) коэффициентом яркости в диапазоне углов $\theta \pm 30^\circ$, превышающем в три раза значение коэффициента яркости молочного стекла МС-20 в спектральных областях $\lambda = 0,63$ и $3,39$ мкм, а также разработана технология изготовления отражающей поверхности. Получены оптические характеристики поверхности (рис. 1, кривая 1 — $\lambda = 0,63$, 2 — $3,39$ мкм).



Из рис. 1 видно, что отраженный световой поток фокусируется в рабочем диапазоне углов $\theta < 35^\circ$ от нормали поверхности, за счет чего увеличивается яркость изображения. Однородность отражающих свойств в рабочем диапазоне уменьшает погрешность имитации окружающего пространства.

Реализован раскрой материала, обеспечивающий сферическую форму экрана (рис. 2). Форма экрана представляет собой аппроксимацию сферы из 951 плоской пластины. Отступление от сферической формы не превышает $\pm 2,5$ мм. Пластины с отражающей поверхностью выполнены из алюминия, для каждого из 16 рядов подобрана своя геометрия. Центральная пластина круглая, пластины со 2-го по 16-й ряд имеют трапециевидную форму с эллипсами в основаниях. Раскрой сферы в компьютерной модели выполнен в декартовой системе координат. Зазоры в модели не превышают 5 мкм.

При воздействии излучением поверхность экрана нагревается [5]. Экран не должен содержать тепловых следов при проецировании на него динамических сценариев (движение цели на фоне). Для решения задач такого рода используются водяное и азотное охлаждение,

элементы Пельтье, пневмоохлаждение, естественный теплообмен с воздухом. В нашем случае, благодаря особенностям технологии, оптический рельеф наносится непосредственно на алюминиевые пластины, их толщина выбрана относительно большой — 8 мм, что позволяет, при наличии термостатированного помещения, устранить следы на поверхности экрана для ИК-диапазона.

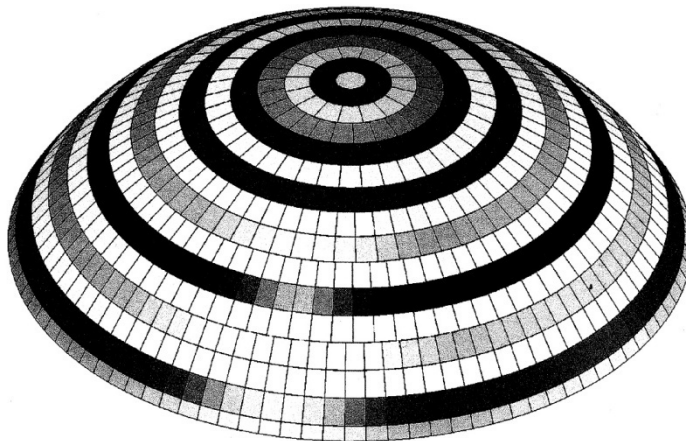


Рис. 2

По результатам проведенного исследования изготовлен экран проецирования; накопленный опыт позволит обеспечить развитие технологии изготовления таких экранов. С возникновением новых ОЛС, работающих в УФ-диапазоне спектра, следует определить требования к экрану проецирования и стенду в целом, характерные для данного диапазона. В настоящей работе использован растр с диаметром лунки 0,4 мм для видимого и ИК-диапазонов спектра. Для перспективных ОЛС с увеличенной разрешающей способностью размер растра следует уменьшать, чтобы избежать негативного влияния структуры растра на отображаемый сценарий. Также следует определить влияние шероховатости отражающей поверхности с растром. Необходимо нивелировать технологические проблемы, связанные с влиянием зазоров в многоэлементном экране на качество отражения проецируемых сценариев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линьков В., Морозов А., Сидоров В. Локационные системы оптического диапазона комплексов ПВО надводных кораблей ВМС иностранных государств // Зарубежное военное обозрение. 2000. № 6. С. 47.
2. Гершун А. А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. С. 476—490.
3. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. С. 75—85.
4. Русинов М. М., Грамматин А. П., Иванов П. Д. и др. Вычислительная оптика: Справочник. М.: УРСС, 2009. С. 136—140.
5. Арутюнов В. А. и др. Состояние и перспективы разработок охлаждаемых матричных ИК-приемников изображения двойного назначения в ОАО "ЦНИИ «Электрон»" // Прикладная физика. 2002. Вып. 6. С. 42—51.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Илья Юрьевич Шмигельский** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; ГОИ им. Вавилова; младший научный сотрудник; E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Валетов В. А., Шмигельский И. Ю. Конструктивно-технологические особенности стенда имитации фоноцелевой обстановки // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 304—307.

**DESIGN AND TECHNOLOGICAL SPECIFICATIONS
OF TARGET ENVIRONMENT IMITATION STAND**

V. A. Valetov, I. Yu. Shmigelsky

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com*

The problems of manufacturing of projection screen for target environment simulating stand are considered. Raster reflecting surface with directional-diffuse light reflection is chosen for the projection screen. Dependence of the reflective surface brightness characteristics on the angle of light flux reflection is analyzed. Method of cooling of the screen surface operating in the visible and infrared spectral regions is defined in accordance with selected technology of the raster manufacturing. A technology for sphere cutting to approximate its shape is developed.

Keywords: projection screen, raster reflecting surface, spectral brightness, target environment imitation stand.

Data on authors

- Vyacheslav A. Valetov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Ilya Yu. Shmigelsky** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; State Optical Institute for the S. I. Vavilov; Junior Researcher; E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Reference for citation: Valetov V. A., Shmigelsky I. Yu. Design and technological specifications of the stand imitation target environment // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 304—307 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-304-307

ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В. А. ВАЛЕТОВ¹, О. С. ЮЛЬМЕТОВА², А. Г. ЩЕРБАК²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: valetov.v@mail.ru

²ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“, 197046, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты работ по обеспечению технологии формирования растрового рисунка на узлах гироскопов, основанной на комплексном применении катодно-ионного напыления и лазерного маркирования тонкопленочного покрытия нитрида титана. Выявлены факторы, существенно влияющие на контрастность растрового рисунка, предложены методы управления этими факторами.

Ключевые слова: пучковые технологии, лазерное маркирование, вакуумное напыление, стехиометрия, нитрид титана.

Повышение точности и надежности гироскопических приборов во многом зависит от разработки качественно новых технологий их изготовления, например, электрофизических методов бездеформационного формообразования. Использование пучковых технологий (например, светолучевой и ионно-вакуумной обработки) обеспечивает требуемые параметры качества указанных изделий. В работе исследуется комбинированное применение технологий вакуумного напыления и лазерного маркирования как метода формирования растрового рисунка на поверхности узлов, являющихся важнейшими элементами оптоэлектронных систем съема информации в гироскопах.

Примером изделий с оптическими системами съема информации могут являться карданные и бескарданные электростатические гироскопы (ЭСГ). Подобные приборы разработаны в России, США и Франции, тогда как попытки их создания в ряде стран Европы (Англия, Германия, Италия) и Азии (Япония, Китай) не привели к успеху. В настоящее время наша страна экспортирует эти приборы, однако передовые позиции РФ в этой области могут быть утрачены, если технологии изготовления не будут развиваться в направлениях, обеспечивающих повышение точности, надежности и расширение функциональных возможностей приборов.

Технические характеристики карданных и бескарданных ЭСГ достигли такого уровня, что именно устройство съема информации становится препятствием для их совершенствования.

Сферический ротор, изготавливаемый, как правило, из бериллия, является основным узлом системы съема информации с ЭСГ. Существующая технология изготовления ротора ЭСГ включает последовательные операции формообразования бериллиевой сферической заготовки, сферодоводки и балансировки ротора, нанесения на сферическую поверхность ротора тонкопленочного покрытия нитрида титана (TiN) методом катодно-ионной бомбардировки, создания растрового рисунка посредством лазерного маркирования. Требуемое качество растра достигается с помощью лазерного маркирования, позволяющего формировать светоконтрастный рисунок практически на любом материале, обеспечивая высокую точность параметров процесса (мощность лазерного излучения, скорость движения луча, частоту следования импульсов и т.д.) [1].

Рисунок формируется за счет образования оксидной пленки под действием лазерного излучения, параметры этого процесса можно оценить с помощью термодинамических расчетов [2].

Выбирают такие режимы лазерной обработки, чтобы толщина полученного растрового рисунка была меньше толщины покрытия, это обеспечивает возможность построения алгоритма технологического процесса с обратными связями, т.е. позволяет при каких-либо отклонениях в параметрах готового ротора стравливать и повторно наносить износостойкое покрытие и формировать растровый рисунок. Это особенно важно, поскольку наиболее трудоемкими операциями изготовления ротора являются балансировка и сферодоводка (должна обеспечиваться геометрическая точность окончательно обработанной сферы с точностью до десятых и сотых долей микрометра).

Вместе с тем указанная технология имеет следующие недостатки:

1) для обеспечения требуемой толщины растрового рисунка (0,6—1,5 мкм) необходимо уменьшать интенсивность воздействия лазерного излучения на поверхность покрытия, снижая, в первую очередь, его мощность. Снижение мощности приводит к уменьшению контрастности рисунка [3], что крайне нежелательно, поскольку контрастность растрового рисунка является функциональным параметром ротора, непосредственно определяющим эксплуатационные характеристики гироскопа;

2) сложность получения требуемых значений контрастности и степени равномерности растрового рисунка растра за счет увеличения толщины покрытия TiN и, как следствие, растра, поскольку толщина покрытия более 2 мкм негативно сказывается на таких характеристиках ротора, как дисбаланс и геометрия;

3) низкая эффективность процесса варьирования всем комплексом параметров процесса лазерного маркирования (мощность излучения лазера, скорость перемещения сканера, плотность линий, частота следования импульсов) при толщине растра, не превышающей толщины покрытия TiN. Каждый указанный параметр в различной степени влияет на коэффициент отражения и толщину растра. Однако сложные комбинации всех параметров трудно обеспечивать с необходимой точностью, что определяет низкий уровень практической реализации.

Целью исследования являлось расширение технологических возможностей комбинированного использования двух пучковых технологий — вакуумного напыления и лазерного маркирования — в процессе изготовления ротора электростатического гироскопа. Для достижения поставленной цели следовало решить задачу выявления для последовательно выполняемых операций катодно-ионного напыления и лазерного маркирования общих признаков в растровом рисунке.

Рассмотрев механизмы формирования покрытия TiN при напылении и лазерном маркировании, можно отметить, что в обоих случаях большое значение имеют структурно-фазовые характеристики материала, которые влияют на свойства растрового рисунка. Для TiN, представляющего собой твердый раствор внедрения с широкой областью гомогенности, при стандартных условиях и режимах вакуумного напыления, цвет покрытия образцов изменяется от светлого золотисто-желтого (давление азота $P = 0,035$ Па) до темного золотисто-желтого ($P = 1,04$ Па) [3]. При $P = 0,058—0,81$ Па формируется мелкая плотная текстура, близкая к структуре TiN. Можно сказать, что при $P < 0,058$ Па образуется нитрид титана TiN_x , где $x = 0,58—1,00$.

При лазерном маркировании растрового рисунка весьма важно обеспечить его контрастность ($K = 0,55—0,75$) [4]:

$$K = \frac{R_b - R_r}{R_b + R_r}, \quad (1)$$

где R_b и R_r — коэффициенты отражения базовой (покрытой нитридом титана) и растровой поверхности ротора соответственно.

Из выражения (1) следует, что получить необходимое значение K можно, варьируя как величину R_r , определяемую параметрами процесса лазерного маркирования, так и R_b , задаваемую стехиометрией покрытия TiN.

Экспериментально выявлено, что наиболее эффективный способ получения раstra с требуемой контрастностью и толщиной — варьирование стехиометрического состава TiN с приближением цвета к светлому золотисто-желтому.

В процессе лазерного маркирования происходит изменение структурно-фазового состава покрытия с окислением его поверхности и образованием оксидов титана, из которых основными являются TiO_2 , Ti_2O_3 и TiO (в качестве материала покрытия применяют вещества от TiO_2 до Ti_2O_3). С точки зрения получения требуемой контрастности раstra наибольший интерес представляет оксид Ti_2O_3 , который имеет темно-фиолетовый цвет. Условия формирования Ti_2O_3 определяются посредством термодинамических расчетов и уточняются экспериментально.

Таким образом, поставленная в работе задача была решена выбором структурно-фазового состава покрытия TiN в качестве общего признака последовательных процессов формирования покрытия и лазерного маркирования, а достижение цели обеспечено тем, что процесс нанесения покрытия осуществляют в условиях, определяющих образование нитрида титана формулы TiN_x , где $x=0,6—0,9$. Покрытия указанного состава формируют, регулируя давление азота при вакуумном напылении в пределах $0,45—0,75$ от значения давления, требуемого для получения стехиометрического состава покрытия [5].

Таким образом, предложенная технология базируется на комплексном применении вакуумного напыления покрытия TiN и лазерного маркирования рисунка, выявлено, что общим регулируемым фактором является структурно-фазовый состав покрытия. Определены технологические методы регулирования этого фактора. В процессе напыления регулируется стехиометрия покрытия TiN, а на стадии лазерного маркирования — химический состав рисунка. В целом это значительно повышает уровень технологического обеспечения процесса изготовления ротора ЭСГ и позволяет получить качественно новые функциональные параметры растрового рисунка.

Предложенное решение позволяет не только расширить технологические возможности процесса изготовления ротора, но и улучшить экономические показатели, так как гарантированно обеспечивает возвратный характер процесса и дает возможность повторного выполнения наиболее критичных и важных операций при изготовлении таких трудоемких конструкций, как ротор электростатического гироскопа.

При апробации предложенной технологии в ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“ изготовлена опытная партия бериллиевых роторов электростатических гироскопов, получены положительные результаты. В настоящее время разрабатывается техническая документация для ее использования в серийном изготовлении электростатических гироскопов (роторов).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-31097

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юльметова О. С. Разработка технологических методов управления функциональными характеристиками узлов гироскопов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2011. 24 с.
2. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании растрового рисунка на узлах гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. Вып. 05 (75). С. 91.
3. Матлахов В. П. Зависимость физико-механических свойств нитрид-титановых покрытий от давления азота // Вестн. БГТУ. 2006. № 2. С. 93—96
4. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 05(69). С. 28—34.

5. Патент РФ № 2498224. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, Б. Е. Ландау, А. Я. Бузык, В. П. Вейко, В. А. Валетов. 10.11.2013.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Ольга Сергеевна Юльметова** — канд. техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: a_sch@gtn.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Валетов В. А., Юльметова О. С., Щербак А. Г. Применение пучковых технологий при изготовлении узлов гироскопических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 308—311.

APPLICATION OF BEAM TECHNOLOGIES TO GYROSCOPIC INSTRUMENT MANUFACTURING

V. A. Valetov¹, O. S. Yulmetova², A. G. Scherbak²

¹ ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valetov.v@mail.ru

² Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint Petersburg, Russia

Technology of raster drawing on gyroscopic instrument components is considered. Results of investigation carried out to support the technology based on integrated application of as cathode-ion sputtering of titanium nitride coating and laser marking of the coating are presented. Factors significantly affecting the raster drawing contrast are revealed, methods for control over the factors are proposed.

Keywords: beam technologies, laser marking, vacuum deposition, stoichiometry, titanium nitride.

Data on authors

- Vyacheslav A. Valetov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Olga S. Yulmetova** — PhD; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Alexander G. Scherbak** — Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: a_sch@gtn.ru

Reference for citation: Valetov V. A., Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Application of beam technologies to gyroscopic instrument manufacturing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 308—311 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-308-311

АНАЛИЗ ИНДИКАТРИС СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОГЕОМЕТРИЕЙ

И. Ю. ШМИГЕЛЬСКИЙ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

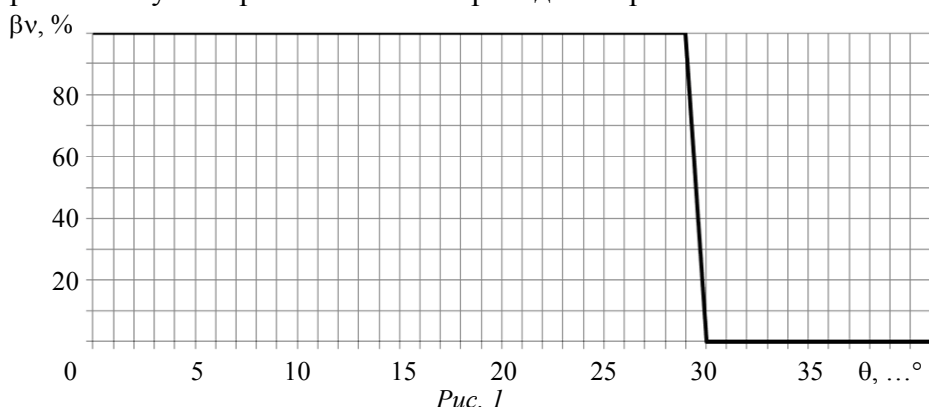
Сравниваются индикатрисы спектральных коэффициентов яркости поверхностей, характеризующихся различной микрогеометрией. Проанализирована возможность применения таких поверхностей в проекционных экранах для инфракрасного диапазона. Представлены особенности направленного светоотражения поверхности с регулярным микрорельефом в виде шестигранных сферических ячеек.

Ключевые слова: проекционный растровый экран, спектральный коэффициент яркости.

Для комплектации стендов полунатурных испытаний бортовой оптической аппаратуры на базе сферических проекционных экранов предлагается использовать экран с отражающей поверхностью, обладающей увеличенным коэффициентом яркости. Яркость отраженного от поверхности сигнала характеризуется индикатрисой относительного коэффициента яркости β_v этого сигнала в исследуемом диапазоне углов отражения. При имитации фоноцелевой обстановки необходимо реализовать на экране ламбертовское рассеяние, чтобы экран не вносил погрешности в отображаемый сценарий.

Задача получения изображения в ряде случаев может быть решена за счет использования оптических систем, представляющих собой совокупность отдельных элементов, каждый из которых создает изображение одной точки — элемента изображения. Подобного рода оптические системы называются растровыми [1].

Растровая поверхность позволяет сузить угол рассеяния светового потока, благодаря чему достигается увеличение коэффициента яркости поверхности по сравнению с поверхностью с нормальным рассеянием. Относительный коэффициент яркости β_v идеальной отражающей поверхности с углом рассеяния $\pm 30^\circ$ приведен на рис. 1.



В настоящей работе исследовалась отражающая поверхность с углом рассеяния $\pm 30^\circ$. Задачей эксперимента являлся поиск зависимости индикатрисы спектральных коэффициентов яркости от микрогеометрии поверхности.

По результатам анализа известных в мировой практике методов обработки отражающих поверхностей экранов предложено использовать пескоструйную обработку, нанесение краски ВИАМ на поверхность, обработку поверхности алмазным бором (фрезерование алмазным

бором и нанесение микроштрихов), нанесение на поверхность с различной степенью незамошенности конических ячеек различной глубины и диаметра, нанесение сферических ячеек на поверхность, равномерное нанесение сферических ячеек на поверхность.

Для каждого вида обработки поверхностей построены индикатрисы относительного коэффициента яркости, проанализированы особенности геометрической структуры и проанализирован характер рассеивания отраженного излучения для $\lambda = 3,39$ мкм.

На рис. 2, а представлена поверхность с неравномерно распределенными микроштрихами различной длины, ширины ($\approx 0,3$ — 2 мм) и направления. В некоторых зарубежных проекционных экранах используется похожая структура микрогеометрии на основе микроштрихов [2].

На рис. 2, б представлена поверхность со сферическими шестигранными ячейками диаметром $\approx 0,4$ мм, глубиной $\approx 0,04$ мм, обеспечивающими плотное замощение.

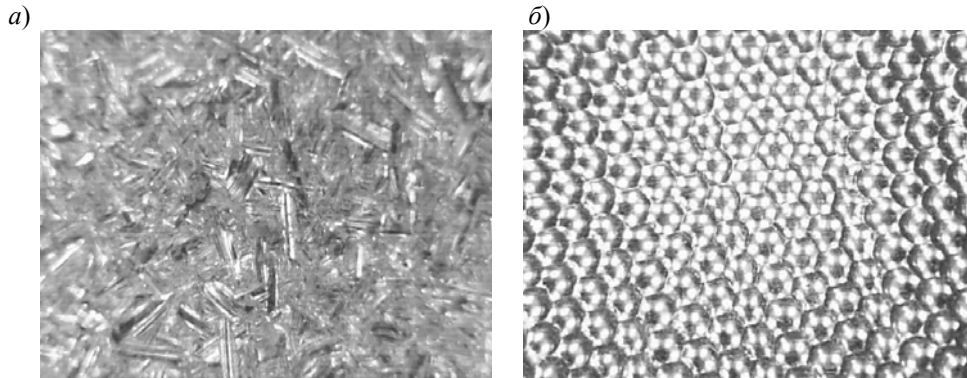


Рис. 2

На рис. 3 приведены индикатрисы относительного коэффициента яркости всех исследованных образцов поверхностей для длины волны $\lambda = 3,39$ мкм. Измерения проводились на гониоспектрофотометрической установке [3]. Дискретность измерений 1° , погрешность 3 %.

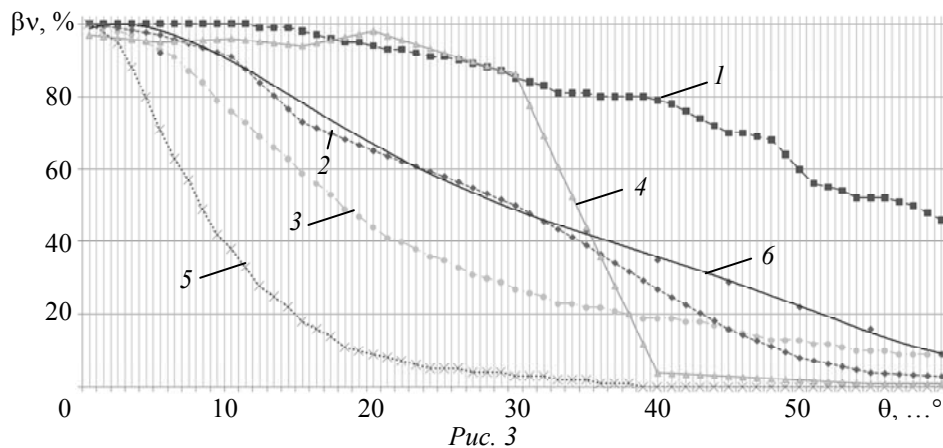


Рис. 3

Из кривой 1 видно, что образец поверхности после пескоструйной обработки в диапазоне углов $\theta = 0$ — 30° составляет $\beta_v \approx 90$ %. Абсолютное значение яркости в рабочем диапазоне будет ниже, чем у образца со сферическими ячейками (кривая 2), поскольку в нерабочем диапазоне углов $\theta > 30^\circ$ коэффициент яркости также имеет высокие значения.

Поверхность после фрезерования инструментом по типу алмазного бора (кривая 3) имеет $\beta_v \approx 60$ % в середине рабочего диапазона при $\theta \approx 15^\circ$ и $\beta_v \approx 25$ % — при $\theta \approx 30^\circ$. Во избежание потерь при имитации сценариев (движения цели на фоне) нижний порог распознавания цели необходимо опустить до минимального значения яркости экрана в рабочем диапазоне углов. Данное условие уменьшает эффективность всего экрана при наличии низких значений коэффициента яркости β_v в диапазоне углов 0 — 30° .

Наиболее близка к теоретической кривая индикатрисы поверхности после равномерного нанесения сферических ячеек (кривая 4). Минимальное значение относительного коэффициента

в рабочем диапазоне составляет около 90 % при $\theta \approx 30^\circ$. При больших углах значение коэффициента яркости стремятся к нулю. Таким образом, основная часть светового потока концентрируется в рабочем диапазоне углов. На рис. 3 также приведены графики для обработки нанесением краски ВИАМ (кривая 5) и нанесением на поверхность конических ячеек (кривая 6).

Эффективность экрана с равномерно нанесенными сферическими ячейками на его поверхность в три раза выше традиционно используемого матового экрана. Сокращение рабочего диапазона в два раза позволит увеличить коэффициент яркости вдвое при реализации соответствующей индикатрисы.

Использование проекционного экрана с равномерно нанесенными сферическими ячейками для комплектации стендов полунатурных испытаний бортовой аппаратуры позволяет увеличить яркость изображения и тем самым снизить требования к проекторам, что особенно критично для работы в ИК-диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов М. М., Грамматин А. П., Иванов П. Д. и др. Вычислительная оптика: Справочник. М.: УРСС, 2009. С. 136—140.
2. MOCOM Solstice [Электронный ресурс]: <<http://mocomscreens.com/technology/concave-screen-tech/>>.
3. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. С. 37—45.

Сведения об авторах

Илья Юрьевич Шмигельский — аспирант; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; ГОИ им. Вавилова; младший научный сотрудник;
E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Шмигельский И. Ю. Анализ индикатрис спектральных коэффициентов яркости поверхностей с различной микрогеометрией // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 312—314.

ANALYSIS OF INDICATRICES OF THE SPECTRAL BRIGHTNESS COEFFICIENT FOR SURFACES WITH DIFFERENT MICROGEOMETRY

I. Yu. Shmigelsky

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Indicatrices of the spectral luminance coefficient for surfaces with different microgeometry are compared. Applicability of these surfaces as projection screens for infrared spectral range is analyzed. Peculiarities of directional light reflection from a surface with a regular microrelief in the form of hexagonal spherical cells are demonstrated.

Keywords: raster projection screen, spectral brightness coefficient.

Data on author

Ilya Yu. Shmigelsky — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; State Optical Institute for the S. I. Vavilov; Junior Researcher; E-mail: shmigelsky90spb@gmail.com

Reference for citation: Shmigelsky I. Yu. Analysis of indicatrices of the spectral brightness coefficient for surfaces with different microgeometry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 312—314 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-312-314

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Р. М. ИСАЕВ¹, А. В. ЛЮБИВЫЙ²

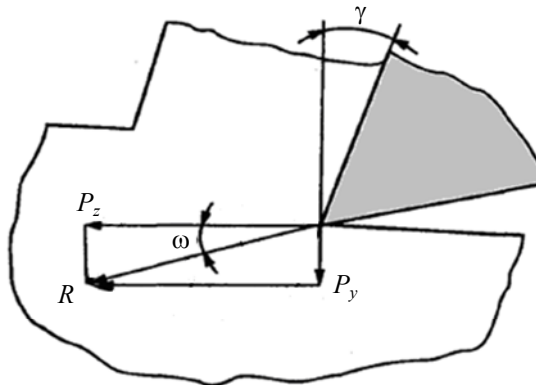
¹ ОАО „Техприбор“, 196128, Санкт-Петербург, Россия

² ОАО „Камчатский гидрофизический институт“, 197183, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

Рассмотрены два способа определения силы резания — важной составляющей моделирования в системе инженерного анализа. Обоснована целесообразность применения способа, основанного на постулатах теории резания.

Ключевые слова: силы резания, механообработка, деформация, система инженерного анализа.

При анализе процесса резания необходимо рассматривать усилия, возникающие между резцом и заготовкой в процессе механической обработки, как систему тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x составляющих сил резания. В процессе точения система сил может быть приведена к одной равнодействующей R (см. рисунок) — силе резания. Точка приложения этой силы находится на рабочей части режущей кромки [1, 2].



При определении силы резания классическими методами в инженерных расчетах используются эмпирические зависимости ее значений от режимов резания. После проведения ряда экспериментов по определению этой зависимости была выведена формула, традиционно используемая в справочниках по механической обработке:

$$P_i = C_{P_i} t^f s^g V^h K_{q_i}, \quad (1)$$

где P_i — составляющая силы резания; C_{P_i} — постоянный коэффициент, отражающий влияние условий обработки, поддерживаемых постоянными в ходе эксперимента; t — глубина резания (мм); s — подача (мм/об); V — скорость резания (м/мин); показатели f , g , h характеризуют интенсивность влияния соответствующего элемента режима резания на P_i ; K_{q_i} — коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала, геометрию инструмента, износа и других факторов, не учитываемых коэффициентом C_{P_i} [3, 4].

Силу резания возможно рассчитать не только по эмпирической формуле (1), но и по формулам, построенным согласно постулатам теории резания. В большинстве случаев практический интерес представляет только расчет основных характеристик процесса, а именно

усадки стружки и сил резания. Ниже приведены необходимые формулы, выведенные для расчета усадки стружки и равнодействующей силы резания [5]:

$$\xi = \frac{\cos(\varphi_1 - \gamma)}{[1 - n\varepsilon_1 F(\varphi_1)]^{n-1} \sin \varphi_1}, \quad R = \frac{Aa^l b^m \xi \varepsilon_1^{n-1} \sin \varphi_1}{\cos(k\varphi_1 + \omega) \cos(\varphi_1 - \gamma) \sin(k\varphi_1)}, \quad (2)$$

ε_1 — деформация относительного сдвига на правой границе пластической зоны; φ_1 — угол между правой границей пластической зоны и плоскостью резания; γ — передний угол; k — коэффициент, учитывающий характер напряженного состояния в пластической зоне; ω — угол между равнодействующей силой и плоскостью резания; ξ — усадка стружки; n — коэффициент, характеризующий упрочнение обрабатываемого материала при пластической деформации (характеристика политропы сдвига); A — параметр, характеризующий сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу при $\varepsilon = 1$; a и b — толщина и ширина срезаемого слоя.

При моделировании процесса механической обработки в САЕ-системе необходимо задать ряд входных параметров, в частности, силы резания. Перед авторами настоящей статьи была поставлена задача выбора способа расчета силы резания — с использованием формулы (1) или (2).

Был проведен эксперимент, в ходе которого на токарном обрабатывающем центре с числовым программным управлением HAAS SL-10T были изготовлены тонкостенные детали из трех видов конструкционных материалов при различных режимах резания. В результате эксперимента были измерены деформации на всех деталях.

Далее по эмпирическим формулам (1) и по формулам профессора Зорева Н. Н. (2) с учетом свойств обрабатываемых материалов и назначенных режимов был проведен расчет сил резания. На основании полученных данных в САЕ-системе ANSYS были определены деформации заготовки. Результаты представлены в таблице, где Δ_1 — деформации, рассчитанные по формуле (1), Δ_2 — деформации, рассчитанные по формуле (2), Δ — измеренные деформации.

№ эксперимента	Материал	t , мм	s , мм/об	Δ_1 , мкм	Δ_2 , мкм	Δ , мкм
1	Алюминий Д16Т	0,25	0,18	8,21	5,78	9
2		0,5	0,18	11,8	11,6	13
3		0,5	0,09	7,89	6,88	9
4		0,25	0,09	5,48	3,44	6
5	Бронза АЖ9-4	0,25	0,18	3,32	1,52	4
6		0,5	0,18	6,64	3,04	9
7		0,5	0,09	3,32	1,92	4
8		0,25	0,09	1,66	0,96	2
9	Сталь40	0,25	0,18	3,71	2,47	5
10		0,5	0,18	7,85	4,91	9
11		0,5	0,09	3,79	3,15	5
12		0,25	0,09	1,79	1,59	2

Из таблицы видно, что силы резания, рассчитанные с использованием формулы (2), близки к экспериментальным значениям.

Стоит отметить, что использование системы инженерного анализа при моделировании процесса механической обработки позволяет еще на этапе проектирования технологического процесса определить возможные деформации заготовки и назначить оптимальные режимы резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Жигалко Н. И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Мн.: Выш. школа, 1981. 560 с.
2. Ящерицын П. И., Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. Теория резания. Мн.: Новое знание, 2006. 512 с.
3. Косилова А. Г., Мещерякова Р. К. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
4. Малов А. Н. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. М.: Машиностроение, 1973. 311 с.
5. Зорев Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания. М., 1952. 362 с.

Сведения об авторах

- Расим Мирмагмудович Исаев** — ОАО „Техприбор“; инженер; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант; E-mail: ras_man@mail.ru
- Андрей Валентинович Любви́й** — ОАО „КГФИ“; инженер-разработчик; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; аспирант; E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Исаев Р. М., Любви́й А. В. Способы определения сил резания, возникающих в процессе обработки заготовок // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 315—317.

**METHODS OF DETERMINING THE CUTTING FORCES ARISING
IN THE ACT OF WORKPIECE PROCESSING**

R. M. Isaev¹, A. V. Lubiviy²

¹ JSC „Tehpribor“, 196128, Saint Petersburg, Russia

² JSC „KGF“ 197183, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

The problem of modeling the process of machining in CAE-systems is considered. A method of cutting force determining based on the cutting theory postulates is justified.

Keywords: cutting force, the machining, deformation, system of engineering analysis.

Data on authors

- Rasim M. Isaev** — JSC „Tehpribor“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: ras_man@mail.ru
- Andrey V. Lubiviy** — JSC „KGF“; Engineer; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; Post-Graduate Student; E-mail: lubiviyandrey@gmail.com

Reference for citation: Isaev R. M., Lubiviy A. V. The methods of determining the cutting forces that arise in the processing of machining the parts // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 315—317 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-315-317

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИЗУАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ САПР ПЛАНИРОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

В. С. ШЕСТАКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shestakoffvs@gmail.com*

Представлены результаты исследований по оптимизации работы визуальной составляющей САПР планировки производства. Для преодоления проблемы дублирования информации об объектах, представленных на виртуальной сцене одинаковыми моделями, при работе системы создания трехмерных макетов производств использована технология Geometry Instancing. Полученная благодаря этому архитектура системы позволила устранить дублирование; помимо того, удалось достичь уменьшения размера структуры данных, описывающей проект цеха. При нагрузочном тестировании системы на примере виртуальной сцены с тремя видами станков (500 объектов) получены требуемые значения производительности.

Ключевые слова: *оптимизация, визуализация, Geometry Instancing, планировка производства, САПР.*

Использование программного обеспечения для решения инженерных задач зачастую возможно лишь при наличии высоких вычислительных мощностей. Крупные компании, обладая значительными финансовыми возможностями, способны обеспечить условия для функционирования подобного ПО, но тенденции в организации производства к кооперации и аутсорсингу* определяют необходимость оптимизации ПО для использования его маленькими компаниями с ограниченными материальными ресурсами.

Условно в архитектуре любого программного комплекса можно выделить ядро, графический интерфейс и визуализатор. Ядро включает в себя расчетную часть ПО, т.е. алгоритмы получения целевой информации, на него ложится основная нагрузка в САЕ-системах, основной задачей которых является расчет нагрузок по заданной математической модели. Графический интерфейс обеспечивает взаимодействие с пользователем. Визуализатор отвечает за графическое представление результатов расчетов или процесса проектирования [2, 3], на него ложится основная нагрузка в САД-системах, основной целью которых является обеспечение максимально удобного и наглядного процесса проектирования.

Автором настоящей статьи ведется разработка web-ориентированной САД-системы для проектирования трехмерных макетов производств. Самой затратной в плане вычислительных ресурсов задачей является визуализация большого количества моделей, представляющих

* Аутсорсинг (от *англ.* outsourcing — outer-source-using, использование внешнего источника/ресурса) — задача организацией на основании договора определенных бизнес-процессов или производственных функций на обслуживание другой компанией, специализирующейся в соответствующей области [1].

производственное оборудование. В качестве критерия оценки работоспособности системы можно использовать число рассчитываемых кадров за секунду (Frame Per Second, FPS). Стоит отметить, что интерактивное (с возможностью взаимодействовать в режиме реального времени) представление цеха на экране монитора достигается за счет смены статических изображений (кадров), которые рассчитываются системой в процессе функционирования. Для комфортной работы пользователя (смена кадров не заметна) необходимо обеспечить минимум 60 FPS.

Процесс формирования изображения включает следующие шаги:

- 1) получение из файла информации о трехмерной модели;
- 2) выделение в памяти компьютера места под хранение полученной информации;
- 3) использование в процессе создания изображения информации о геометрических построениях.

Особое внимание следует обратить на второй шаг. Информация о модели может храниться:

- в простых массивах в оперативной памяти;
- в особом, упорядоченном, виде в оперативной памяти;
- в особом, упорядоченном, виде в памяти графической карты (Vertex Buffer Object, VBO).

Последний способ является особенностью OpenGL**, он позволяет обеспечить максимальную скорость обращения к данным, а следовательно, и максимально возможную (в сравнении с остальными способами) производительность.

В процессе разработки системы для каждой загруженной из файла трехмерной модели создавался VBO. В момент копирования объекта (пользователь размещает два станка одного типа) для него выделялись новые ресурсы с целью хранения аналогичной информации. Однако дублирование информации влечет за собой нерациональное использование ресурсов. Для преодоления этой проблемы была использована технология Geometry Instancing, подробно описанная в работах [4, 5] применительно к задаче разработки компьютерных игр. Использование именно этой технологии целесообразно, поскольку разработан способ представления в виртуальном пространстве технологического оборудования [6], согласно которому каждая функциональная группа оборудования представляется в проекте цеха одной трехмерной моделью.

В открытой печати не найдены какие-либо методические указания по использованию технологии Geometry Instancing при разработке САД-систем. В связи с этим автор проанализировал несколько возможных способов применения этой технологии для решения задачи дублирования информации и выполнил опытное проектирование. В результате была разработана архитектура системы, характеризующаяся тем, что:

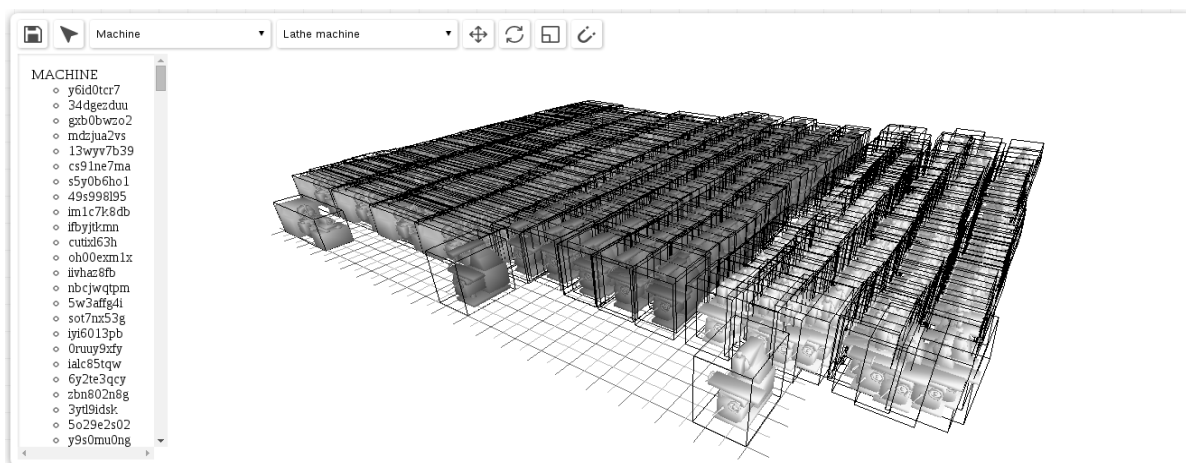
- для каждой уникальной загруженной в систему модели создается отдельный VBO;
- информация о созданных VBO помещается в палитру моделей, в которой ключ является уникальным идентификатором вида модели.

Эта архитектура имеет следующие преимущества: отсутствие дублирования информации; уменьшение размеров структуры, описывающей проект цеха. К недостаткам можно отнести то, что проект цеха может быть успешно визуализирован только при отсутствии изменений в палитре моделей, с помощью которой он создавался.

На рисунке представлена нагрузочная сцена с 500 объектами (отобразить такое количество объектов может быть необходимо при проектировании склада производственного оборудования), представляющими собой станки трех видов. Достигнута требуемая производительность

** OpenGL (Open Graphics Library, открытая графическая библиотека, графический API) — спецификация, определяющая независимый от языка программирования платформонезависимый программный интерфейс для написания приложений, использующих двумерную и трехмерную компьютерную графику.

системы — 60 FPS. Компьютер, на котором производилось нагрузочное тестирование, обладает следующими характеристиками: процессор Intel Core i5-3337U CPU @ 1.80GHz × 4; оперативная память 3,8 ГБ; графическая карта Intel HD Graphics 4000; ОС Debian GNU/Linux 8 (jessie) 64 бит.



В результате выполненной работы определен способ преодоления проблемы дублирования информации в процессе хранения одинаковых трехмерных моделей с помощью технологии Geometry Instancing. При нагрузочном тестировании системы получены удовлетворительные результаты производительности (60 FPS). Описанная архитектура системы обеспечивает рациональное использование вычислительных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аутсорсинг [Электронный ресурс]: <<http://ru.wikipedia.org/wiki/Аутсорсинг>>.
2. *Gregory J.* Game Engine Architecture. Massachusetts: A K Peters, Ltd. Wellesley, 2009. 830 p.
3. *Шалиткин А. В.* Шаблон проектирования графического редактора // Вестн. ВГУ. Сер. „Системный анализ и информационные технологии“. 2010. Т. 1. С. 95—98.
4. *Phar M.* GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation. Addison-Wesley, 2005. 814 p.
5. *Bailey M., Cunningham S.* Graphics Shaders: Theory and Practice. Massachusetts: A K Peters/CRC Press, 2011. 518 p.
6. *Шестаков В. С.* Методика разработки эффективного трехмерного редактора для проектирования планировок производств: Магистерская работа. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 87 с.

Сведения об авторе

Виктор Сергеевич Шестаков — аспирант; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения;
E-mail: shestakoffvs@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: *Шестаков В. С.* Оптимизация производительности визуальной составляющей САПР планировки производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 318—321.

**OPTIMIZING PERFORMANCE OF VISUALIZATION COMPONENT
OF SYSTEM OF AUTOMATED DESIGN OF INDUSTRIAL LAYOUTS****V. S. Shestakov***ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: shestakoffvs@gmail.com*

The “geometry instancing” technology is applied to the problem of optimization of visual component of system of automated design of industrial layouts. The technology makes it possible to avoid duplication of information on objects represented by same models, and to reduce the size of the data structure describing the project of production department. Results of stress testing of the system carried out for virtual scene with 500 objects representing three types of machines are in agreement with required rate of 60 frames per second.

Keywords: optimization, visualization, geometry instancing, plan production, CAD.

Data on author**Viktor S. Shestakov**

— Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: shestakoffvs@gmail.com

Reference for citation: *Shestakov V. S. Optimizing performance of visualization component of system of automated design of industrial layouts // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 318—321 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-318-321

МЕТОД ОЦЕНКИ ТРУДОЕМКОСТИ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГРУППЫ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

М. С. КАЗАНЦЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: maximkazantsev@gmail.com*

Рассмотрены особенности процесса оценивания трудоемкости разработки управляющих программ для станков с ЧПУ, исследована актуальность разработки нового метода ее выполнения. Предложен метод, предназначенный для получения оценки трудоемкости заказов, содержащих большое количество деталей. Метод учитывает специфику современных САМ-систем и спектр доступных для использования на предприятиях металлорежущих станков с ЧПУ.

Ключевые слова: оценка трудоемкости, управляющая программа, САМ-система, ЧПУ, унификация конструкторско-технологических элементов.

В последние годы все более актуальной становится задача налаживания внутригосударственной и международной межзаводской кооперации для выполнения производственных заказов [1]. Решение этой задачи также является одной из целей создания производственных кластеров, объединений и ассоциаций [2—5]. Когда производственные заказы между предприятиями распределяются на конкурентной основе, большое значение получает правильное оценивание трудоемкости их выполнения. Для большинства этапов технологической подготовки производства и непосредственно изготовления изделий используются разработанные нормы [6—9].

Для оценивания трудоемкости разработки управляющих программ (УП) обычно применяется метод экспертных оценок. Его основным преимуществом является скорое получение результата, а недостатком — необходимость привлечения специалиста, обладающего большим опытом в разработке УП. Поэтому необходимо разработать метод оценивания, который можно использовать без привлечения специалистов и который позволяет учитывать возможности применяемых на предприятиях современных САМ-систем и металлообрабатывающих станков с ЧПУ (токарных, многокоординатных фрезерных, токарно-фрезерных и многозадачных).

Предлагаемый метод оценки трудоемкости разработки УП заключается в транспонировании значений трудоемкости отдельных деталей заказа на все остальные детали с применением поправочных коэффициентов. Исходными данными метода являются трехмерные модели с представленными в виде аннотаций техническими требованиями или чертежи (в случае отсутствия аннотаций) на каждую из деталей заказа. Процедура оценивания включает несколько этапов.

Первый этап заключается в сборе и обработке данных о деталях заказа: количестве поверхностей, габаритах детали, минимальной толщине стенок, требованиях по точности и шероховатости и т.д. На основании этих данных на следующем этапе происходит выбор деталей с целью получения подробной оценки трудоемкости разработки УП для их изготовления, которая выполняется на третьем этапе. При оценке временных затрат на обработку отдельных деталей используются экспериментальные значения трудоемкости типичных операций разработки УП, к которым и применяются поправочные коэффициенты, в зависимости от наличия факторов, влияющих на оцениваемую трудоемкость.

Отдельно стоит отметить такой фактор, как конструкторско-технологическая сложность детали. Было решено оценить его влияние при помощи унификации конструкторско-технологических элементов (КТЭ). Системы унификации и классификации КТЭ, применяемые при разработке технологических процессов, из-за высокой степени автоматизации современных САМ-систем непригодны для решения поставленной задачи. Так, например, значения трудоемкости создания траектории чистового прохода резца по цилиндрической поверхности и поверхности ступенчатого вала различаются на пренебрежительно малую величину. Поэтому для унификации были выделены признаки КТЭ, влияющие на процесс задания параметров траекторий в САМ-системе. Комбинации этих признаков позволили получить перечень унифицированных КТЭ. Для каждого из унифицированных элементов экспериментальным путем были получены значения трудоемкости задания параметров траекторий обработки [10, 11].

На последнем этапе результаты оценки отдельных деталей проецируются на остальные детали заказа, при этом применяют поправочные коэффициенты, рассчитанные на основе собранных и проанализированных на первом этапе данных.

Полученные таким образом значения трудоемкости не только служат экономическим показателем заказа, но и влияют на конечный выбор технологии изготовления деталей этого заказа, поскольку предприятие, как правило, оснащено различными типами оборудования. У компаний, не имеющих собственных станков и арендуемых их на стороне, спектр доступных при проектировании технологии обработки вариантов может быть гораздо шире. В таком случае для определения оптимального по стоимости решения целесообразно рассматривать трудоемкость выполнения заказа с разными вариантами технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кооперация по новым программам ОАО „Объединенная Авиастроительная Корпорация“ [Электронный ресурс]: <http://www.ulsez.ru/storage/files/Konf_post2013.rar>.
2. Жуков А. Бесперспективные дизели // РосБизнесКонсалтинг. М., 2009 [Электронный ресурс]: <<http://www.rbcdaily.ru/industry/562949979102651>>.
3. Об Ассоциации // Ассоциация Судостроительных Компаний Сибири. Ангарск, 2012—2014 [Электронный ресурс]: <<http://asksib.ru/info/about/>>.
4. Зверева П. Государственных средств в финансировании больше, чем средств предприятий // Деловой авиационный портал АТО.ру: информ.-справочный портал. М., 2013. [Электронный ресурс]: <<http://www.ato.ru/content/gosudarstvennyh-sredstv-v-finansirovanii-bolshe-chem-sredstv-predpriyatiy>>.
5. Зимин К. Будущее — за промышленной кооперацией и внедрением инновационных технологий. М., 2009 [Электронный ресурс]: <<http://www.iemag.ru/analitics/detail.php?ID=19540>>.
6. Шарафеев И. Ш., Закиров И. М. Расчет режимов резания и норм времени на основе концепции моделирования систем автоматизации технологического назначения. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та., 2006. 180 с.
7. Шарин Ю. С., Якимович Б. А., Толмачев В. Г., Коршунов А. И. Теория сложности. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. 132 с.
8. Домбращев А. Н. Разработка автоматизированной системы определения сложности и прогнозной трудоемкости изготовления деталей инструментального производства. Дис. ... канд. техн. наук. Ижевск: ИжГТУ, 2005. 128 с.
9. Акимов И. В. Самообучающаяся система экспресс-оценки трудоемкости изготовления деталей машин. Дис. ... канд. техн. наук. Тула: ТГУ, 1999. 208 с.
10. Казанцев М. С. Анализ влияния исходных геометрических данных на трудоемкость процесса разработки управляющих программ для станков с ЧПУ при помощи современных САМ-систем // Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1 Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. С. 58—60.

11. Казанцев М. С., Васильев Н. С. Оценка трудоемкости разработки управляющих программ в современных САМ-системах // Перспективы науки. 2014. № 12. С. 91—94

Сведения об авторе

Максим Сергеевич Казанцев

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения;
E-mail: maximkazantsev@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Казанцев М. С. Метод оценки трудоемкости разработки управляющих программ для изготовления группы деталей на станках с ЧПУ // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 322—324.

METHOD FOR EVALUATION OF TIME EXPENDITURES OF NUMERICAL CONTROL PROGRAM DEVELOPMENT FOR A WORKPIECE SET PRODUCTION USING A CAM SYSTEM

M. S. Kazantcev

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: maximkazantsev@gmail.com*

Peculiarities of the problem of time-expenditures evaluation for development of numerical control programs for CNC machines are considered. A new method for evaluation of time required to execute orders with a large set of workpieces is proposed. The method takes into account specifics of modern CAM systems and a wide range of CNC metal cutting machines used at enterprises.

Keywords: working time evaluation, CAM system, NC program, CNC, unification of construction and technological elements.

Data on author

Maxim S. Kazantcev

— Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: maximkazantsev@gmail.com

Reference for citation: Kazantcev M. S. Method for evaluation of time expenditures of numerical control program development for a workpiece set production using a CAM system // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 322—324 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-322-324

СОЗДАНИЕ АГЕНТА-ВЫЧИСЛИТЕЛЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. А. ПУТИНЦЕВА, А. Н. ФИЛИППОВ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: filippov_an@rambler.ru

Предложен подход к организации и применению агентов-вычислителей. Приведены фрагменты базы знаний в виде фреймов-формул, текстов-переходов и продукций. Описаны функции агента-вычислителя в многоагентной системе технологического назначения в виртуальном строковом пространстве технологических данных.

Ключевые слова: многоагентная система, виртуальное пространство, фреймы, формулы, продукции.

В настоящее время методы многоагентных систем (МАС) в современных САПР находят активное применение [1, 2]. Методология виртуального строкового пространства технологических данных (ВСПТД), на основе которой создается единое информационное пространство описания технологических данных и знаний, а также обеспечивается включение агентов в МАС, была положена в основу САПР технологических процессов механической обработки деталей ТЕХКОМ, используемой на многих отечественных предприятиях [3]. На основе ВСПТД создаются язык коммуникаций, описывающий технические аспекты передачи информации между агентами, и язык описания онтологий заданной предметной области [4].

В ВСПТД онтология базируется на представлении триплета (основной структурный элемент информационной среды):

$$F_i = \langle P_i, N_i, V_i \rangle,$$

где P_i — префикс, обеспечивающий контекстное понятие i -го параметра, т.е. указывающий на определенный описываемый объект; N_i — имя параметра; V_i — значение параметра.

ВСПТД, в свою очередь, представляет собой объединение множества триплетов:

$$F = \cup F_i.$$

При разработке САПР технологического процесса авторами настоящей статьи введено понятие агента-вычислителя, в функции которого входит вычисление формул, вычисление текстов-переходов, интерпретация базы знаний с помощью дедуктивной машины вывода.

Вычисление формул. Технологические знания могут быть представлены, в частности, выражениями, которые включают в себя арифметические операции (сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень), а также тригонометрические (синус, косинус и др.), алгебраические, трансцендентные и другие математические функции. Эти формулы носят как теоретический, так и эвристический характер. В процессе „эксплуатации“ некоторые из них подвергаются корректировке, но будучи „зашитыми“ в программы, они не могут быть исправлены без участия программиста. В этих условиях целесообразно хранить формулы вне программ, как элемент базы знаний, обеспечивая возможность их корректировки силами эксперта.

Авторами настоящей статьи предложен вариант представления формул в виде фреймов. *Фрейм-формула* — арифметическое выражение, представленное в виде символьной строки, в которой значения переменных заданы в виде триплетов целей и постоянных величин (заданных коэффициентов).

Приведем в качестве примера формулу расчета нормы расхода для плоских материалов с известным весом одного квадратного метра:

$$N=BLK_1K_2/10^6n,$$

где N — норма расхода; B — ширина листа; L — длина листа; K_1 — весовая характеристика материала; K_2 — коэффициент отходов в заготовительном производстве; n — количество деталей из заготовки.

В представлении ВСПТД параметру N соответствует имя реквизита $Z.NRM$; B — $Z.B$; L — $Z.L$; K_1 — $M.VH$; K_2 — $M.KTOT$; n — $Z.KD$.

Тогда формула в базе знаний ВСПТД будет иметь вид:

$$\$Z.NRM=\$Z.B*\$Z.L*\$M.VH*\$M.KTOT/(\$Z.KD*10**6);$$

Вычисление текстов-переходов. Рассматривая тексты-переходы как некоторые целевые фразы, содержащие переменную информацию, представленную в виде триплетов цели, нетрудно заметить, что такое представление схоже с представлением знаний в виде фреймов [5].

В такой интерпретации каждому возможному переходу соответствует некоторый фрейм. Например, фрейм *точение* выглядит так:

"точить "\$L.NM=:" выдерживая размеры "\$L.L=:"; \$L.D=:"

Здесь слоты $\$L.NM$, $\$L.L$ и $\$L.D$ представляют собой наименование, длину и диаметр обрабатываемого элемента.

Дедуктивная машина вывода. При проектировании переходов в САПР ТП знания представляются в виде правил вывода (продукций), которые интерпретируются с помощью дедуктивной машины вывода (ДМВ) [6].

ДМВ вычисляет продукцию и формирует результат в виде триплета, который помещается в очередной элемент вектора ответов.

Пример продукции:

ЕСЛИ вид обработки СВЕРЛИТЬ **И НЕТ** технических требований **ТО**
выбрать сверло общего назначения.

Приведенная продукция будет записана в базу знаний в виде строки:

ЕСЛИ (($\$L.WOB = 25$ ИЛИ $\$L.WOB = 27$) **И НЕТ**($\$A.TT$)) **ТО** $\$E.KTS [1,2] = '21'$

При этом возможные значения параметра $\$L.WOB$:

025 — рассверлить, 027 — сверлить. Возможные значения параметра $\$E.KTS$:

21 — сверло общего назначения.

Префиксы и имена триплетов в словаре метаданных могут представлять тот или иной объект: L — элемент обработки, WOB — вид обработки, E — инструмент, KTS — шифр инструмента.

Таким образом, агент-вычислитель выполняет запросы от любого другого агента в многоагентной среде. Предложенный подход, ориентированный на автоматизацию проектирования технологических процессов механической обработки заготовок, может быть использован в смежных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекинов Г. П., Чекинов С. Г. Применение технологии многоагентных систем для интеллектуальной поддержки принятия решения (ИППР) // Системотехника. 2003. № 1.
2. Жмурко С. А. Применение многоагентных технологий для организации доступа к данным в системе гетерогенных САПР // Неделя науки – 2009: Сб. тезисов. Т. 2. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 65—68.
3. Филиппов А. Н. Автоматизированная система проектирования технологических процессов с использованием подхода экспертных систем // Актуальные проблемы современного программирования. Л.: ЛИИАН, 1989. С. 113—122.
4. Афанасьев М. Я. Разработка и исследование многоагентной системы для решения задач технологической подготовки производства. Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2012. 131 с.

5. Филиппов А. Н. Разработки и исследование методов экспертных систем в САПР ТП механической обработки: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1991. 148 с.
6. Сисюков А. Н. Методы построения дедуктивной машины вывода, работающей с виртуальным строковым пространством технологических данных // III Межвуз. конф. молодых ученых. 2006.

Сведения об авторах

- Алина Александровна Путинцева** — студентка; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: YellowFatCat@yandex.ru
- Александр Николаевич Филиппов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: filippov_an@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Путинцева А. А., Филиппов А. Н. Создание агента-вычислителя в многоагентной системе технологического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 325—327.

**CREATION OF CALCULATING AGENT IN MULTI-AGENT
SYSTEM OF TECHNOLOGICAL DESTINATION**

A. A. Putintseva, A. N. Filippov

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: filippov_an@rambler.ru*

An approach to application of calculating agents in multi-agent system (MAS) of technological purpose is proposed. General principles of technological knowledge in the form of formulas, transitions, and inference rules for interaction of the agent computer with MAS are described.

Keywords: multi-agent system, virtual space, formulas, products.

Data on authors

- Alina A. Putintseva** — Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: YellowFatCat@yandex.ru
- Alexander N. Filippov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technology; E-mail: filippov_an@rambler.ru

Reference for citation: Putintseva A. A., Filippov A. N. Creation of calculating agent in multi-agent system of technological destination // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 325—327 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-325-327

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ WEBSOCKET В WEB-ПРИЛОЖЕНИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. С. ШЕСТАКОВ, А. С. САГИДУЛЛИН

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shestakoffvs@gmail.com

Для решения задачи повышения эффективности передачи данных в web-приложениях, реализующие совместную работу нескольких пользователей над одним проектом, исследована технология websocket. Выявлено основное преимущество этой технологии осуществления сетевой связи между клиентом и сервером по сравнению с наиболее часто используемыми технологиями http и ajax. Преимущество заключается в отсутствии необходимости прикрепления к каждому запросу заголовка с информацией для распознавания сервером. Применение технологии websocket позволило значительно повысить эффективность передачи данных благодаря уменьшению размеров запросов за счет отсутствия заголовка.

Ключевые слова: АСТПП, websocket, оптимизация, совместная работа, планировка производств, САПР ТП, ТИС-Процесс.

Информационные технологии внедрились во все сферы деятельности человека, применение новых технологий позволяет находить новые способы решения задач либо повышать эффективность существующих методов. В связи с этим использование новых информационных технологий при решении технологических задач является одним из приоритетных направлений в исследованиях, проводимых на кафедре ТПС. В частности, изучается транспонирование приложений технологического назначения из „desktopной“ среды (приложение функционирует в среде операционной системы компьютера) в браузерную (приложение функционирует только в среде браузера) [1, 2]. Подробнее о специфике web-ориентированного проектирования приложений технологического назначения можно прочесть в работе [3].

Специалисты прогнозируют новый виток в развитии АСТПП, связанный с применением информационных технологий [4, 5]. В настоящей статье описан подход к реализации web-приложений технологического назначения с использованием технологии websocket.

Сетевое взаимодействие „сервер—клиент“ является очень важной частью любого web-приложения. Его реализация в большинстве существующих проектов происходит на основе одной из двух технологий — http или ajax. В основе синхронного протокола прикладного уровня http лежит клиент-серверная технология. Потребители (клиенты) иницируют соединение и отсылают запрос. Поставщик (сервер) ожидает соединения для получения запроса, производит необходимые действия и возвращает результат. Ajax — технология отправки http-запросов в асинхронном режиме с помощью языка программирования javascript. Запрос отправляется, не блокируя основной цикл выполнения приложения. Полученный ответ сервера обрабатывается в фоновом режиме.

Следует отметить, что при использовании обеих технологий запрос снабжается заголовком, содержащим различного рода информацию для обработки его сервером. Наличие заголовка увеличивает размер каждого запроса, негативно сказываясь на скорости его передачи и последующей обработки.

При разработке авторами настоящей статьи двух web-приложений технологического назначения — ТИС-Процесс и ИЕСАД — возникли схожие проблемы. ТИС-Процесс — открытая web-ориентированная и модульная, легко расширяемая система, предназначенная для автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), она позволяет

вести разработку ТП, хранить, редактировать и обрабатывать общую информацию о ТП, информацию о заготовке, маршруте обработки (операций) и пр. Распределенное хранение данных целесообразно при корпоративном использовании системы, т.е. совместной работе сотрудников разных предприятий с общей базой данных [1].

IECAD (industrial engineering CAD) — web-приложение для проектирования трехмерной планировки производства. Подобная разработка стала возможной благодаря технологии WebGL, позволяющей использовать графический процессор компьютера для создания трехмерной графики и вывода ее через окно браузера.

В ТИС-Процесс и IECAD осуществляется связь с сервером, в процессе которой происходит первичная загрузка большого объема данных (базы знаний, базы данных: марки материалов, трехмерные модели и т.п.) с последующей синхронизацией данных при совместной работе двух и более пользователей над одним проектом. В связи с этим необходимо обеспечить максимальную производительность механизма передачи данных.

Websocket — сравнительно новый протокол полнодуплексной связи поверх TCP-соединения, предназначенный для обмена сообщениями между браузером и web-сервером в режиме реального времени. Отличительная особенность этого протокола в том, что в процессе сетевого взаимодействия перестают существовать такие сущности, как сервер и клиент, и все участники сетевого диалога становятся равноправными. Помимо того, заголовочный файл для установления соединения с сервером отправляется только один раз, все последующие запросы отправляются без заголовка, что положительно сказывается на размере отправляемых запросов.

Технология websocket:

- 1) обеспечивает интенсивный обмен данными, требовательный к скорости передачи и пропускной способности канала;
- 2) позволяет сравнительно легко разрабатывать сложные одностраничные web-приложения со множеством различных асинхронных элементов на странице;
- 3) значительно снижает потребление ресурсов (как вычислительной мощности ЭВМ, так и пропускной способности канала) по сравнению с другими способами передачи данных.

К числу недостатков websocket можно отнести:

- 1) поддержку в браузерах;
- 2) нерегламентируемый срок жизни пакета.

Реализацию websocket упрощенно можно описать следующим образом. Клиент с целью установления связи с сервером создает объект специализированного класса на языке программирования javascript. Объект содержит функции, вызываемые в момент открытия и закрытия соединения, а также функции обработки полученных от сервера данных. Далее браузер подключается к серверу с помощью протокола TCP и передает запрос. Поддерживающий технологию websocket сервер отправляет ответ, после чего канал обмена данными готов, TCP-соединение открыто. Как только одна сторона хочет передать другой информацию, она отправляет фрейм данных следующего вида:

0x00, <строка в кодировке UTF-8>, 0xFF.

В начало строки с запросом добавляется нулевой байт 0x00, а в конец — 0xFF. Отправлять таким образом можно такие виды структур данных, как XML, JSON и т.д.

Проанализировав возможности технологии websocket, можно сделать вывод о том, что с ее помощью возможно более эффективно, в сравнении с http и ajax, реализовывать сетевое взаимодействие в приложениях технологического назначения. Отсутствие дублируемой информации в заголовках запросов при использовании websocket оптимизирует механизм передачи данных в случае совместной работы нескольких пользователей над одним проектом через сеть.

Также websocket в большей степени подходит для разработки web-приложений технологического назначения, в силу того что подобные приложения представляют собой сложные html-страницы с большим количеством активных элементов, взаимодействующих с сервером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филлюков Н. Е.* Система администрирования web-ориентированной автоматизированной системы технологической подготовки производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 15—17.
2. *Куликов Д. Д., Сагидуллин А. С., Носов С. О.* Интеграция САД-системы с системами автоматизированного проектирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 18—20.
3. *Brown J.* Стратегии основных PLM-поставщиков в 2014 году и дальше // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. Vol. 1(85). P. 30—36.
4. *Chaniotis I. K., Tselikas N. D.* Is Node.js a viable option for building modern web applications? A performance evaluation study // Computing. Springer. 2014. March. P. 1—22.
5. *Куликов Д. Д., Падун Б. С., Яблочников Е. И.* Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 7—11.

Сведения об авторах

- Виктор Сергеевич Шестаков** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: shestakoffvs@gmail.com
- Александр Сергеевич Сагидуллин** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: sagi.pochta@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: *Шестаков В. С., Сагидуллин А. С.* Применение технологии websocket в web-приложениях технологического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 328—330.

USING WEBSOCKET TECHNOLOGY IN WEB-APPLICATIONS OF TECHNOLOGICAL DESTINATION**V. S. Shestakov, A. S. Sagidullin**

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: shestakoffvs@gmail.com

The use of websocket technology to development of web-based applications of technological destination is considered. The basic advantage of the technology over the technologies in current use (http and ajax) is shown to be the lack of duplicated information in the request header, the advantage makes it possible to improve the data transfer efficiency.

Keywords: CAPP, websocket, optimization, collaboration, production planning, TIS-process.

Data on authors

- Viktor S. Shestakov** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: shestakoffvs@gmail.com
- Alexander S. Sagidullin** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: sagi.pochta@gmail.com

Reference for citation: *Shestakov V. S., Sagidullin A. S.* Using websocket technology in web-applications of technological destination // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 328—330 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-328-330