

**Гусева Р. И.**  
**R. I. Guseva**

**ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТАНОВКЕ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ СИСТЕМ И ОБОРУДОВАНИЯ НА ВНЕСТАПЕЛЬНОЙ СБОРКЕ ФЮЗЕЛЯЖА**

**ORGANIZATION OF INSTALLING ELEMENTS OF MOUNTING SYSTEM AND EQUIPMENT AT FUSELAGE STOCKS OUT ASSEMBLING**

**Гусева Роза Ивановна** – кандидат технических наук, профессор кафедры технология самолетостроения, зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: r\_guseva@knastu.ru

**Ms. Guseva Roza I.** – PhD in Engineering, Professor of the Aircraft building technology department, deputy dean of aircraft building faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: r\_guseva@knastu.ru

**Аннотация.** Предлагается вариант установки элементов крепления систем и оборудования на вне-стапельной сборке фюзеляжа.

**Summary.** The author suggests the variant of installing elements of mounting system and equipment at fuselage stocks out assembling.

**Ключевые слова:** элементы крепления системы и оборудования, способы базирования, технологические зоны, трудоемкость, объем работ.

**Key words:** the elements of mounting system and equipment, locating methods, operational areas, working time, volume of works.

УДК 629.735

Фюзеляж семейства самолетов SSJ1 состоит из шести технологических частей: носового отсека с кабиной экипажа Ф-1, цилиндрического закабинного отсека Ф-2, среднего отсека Ф-3, хвостового цилиндрического отсека Ф-4 (см. рис. 1), подкилевого отсека Ф-5 и отсека вспомогательной силовой установки (ВСУ) Ф-6.

К среднему отсеку крепится центроплан, к подкилевому – киль и стабилизатор. Кабина экипажа и пассажирский салон размещены над полом, а технические и багажно-грузовые отсеки – под полом.

Конструктивные элементы фюзеляжей самолетов семейства полностью унифицированы друг с другом. Конструкция фюзеляжа состоит из тонкой обшивки, в основном толщиной  $\delta = 1,5$  мм, подкрепленной продольным (стрингера, балки) и поперечным наборами (рядовые и усиленные шпангоуты), установленными с шагом 500 мм.

После выполнения сборочных операций по сборке отсеков фюзеляжа в стапелях проводится их стыковка в стапеле общей сборки фюзеляжа. Затем фюзеляж передается на вне-стапельную сборку, где выполняются отдельные объёмы работ: установка элементов крепления систем и оборудования в отсеках, установка остекления салона, установка стеллажей радиоэлектронного оборудования, установка элементов каркаса обтекателя «крыло-фюзеляж», установка люка отсека авионики и люков водоснабжения и удаления отходов, нанесение антикоррозионных покрытий на внутренние поверхности фюзеляжа, установка тепло-звуковой изоляции.

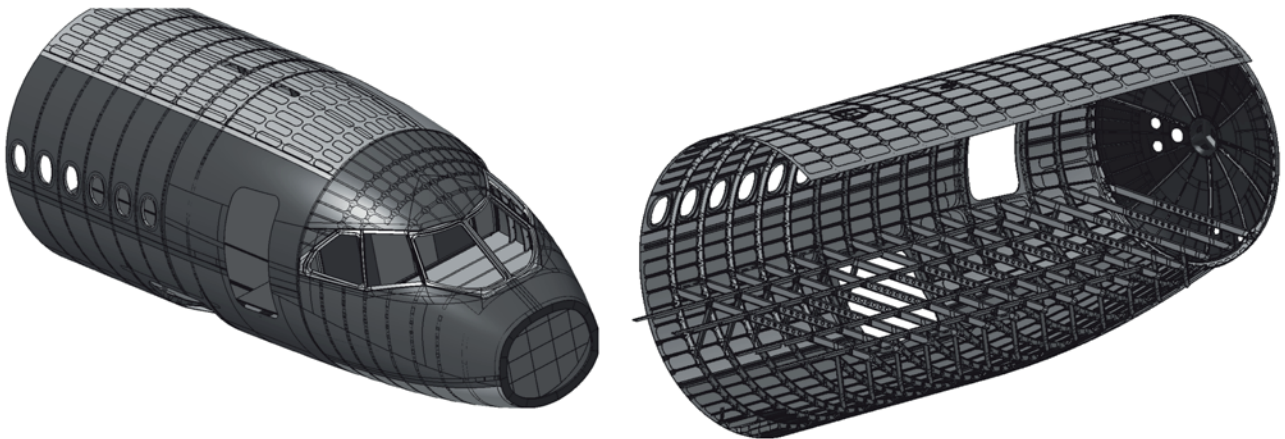


Рис. 1. Головная часть фюзеляжа Ф-1 с отсеком Ф-2 и отсек фюзеляжа Ф-4

Самым трудоёмким процессом является установка элементов крепления для систем и оборудования в отсеках фюзеляжа. Обусловлено это большим количеством входящих деталей крепления (кронштейнов, уголков, проставок, проходников для различных систем и оборудования) и проведением монтажно-сборочных работ по всей площади фюзеляжа (см. рис. 2).

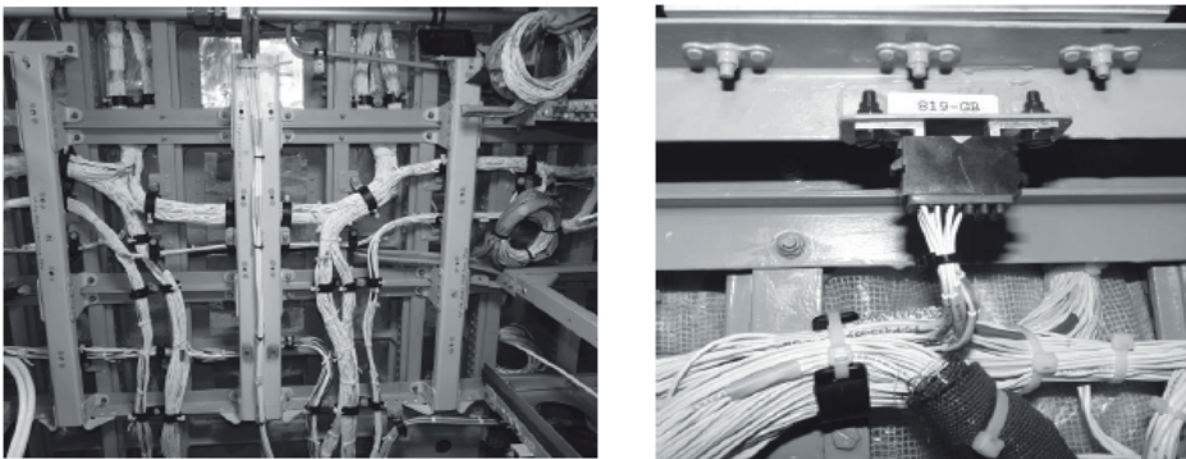


Рис. 2. Примеры элементов крепления для систем и оборудования в фюзеляже

В целях оптимизации сборочно-монтажных работ на внестапельной сборке фюзеляжа необходимо обеспечить наибольшую производительность труда, выполняя одновременно большее количество требуемых работ и снижая время, затрачиваемое на выполнение этих работ.

Для выполнения этих условий на внестапельной сборке разбивают фюзеляж на 21 технологические зоны, обеспечивая независимое и одновременное выполнение монтажно-сборочных работ во всех отсеках фюзеляжа. Например, в зоне отсека Ф-2: правый борт, снаружи (см. рис. 3, а); левый борт, снаружи (см. рис. 3, б); точками показаны элементы крепления, которые устанавливаются на внестапельной сборке фюзеляжа.

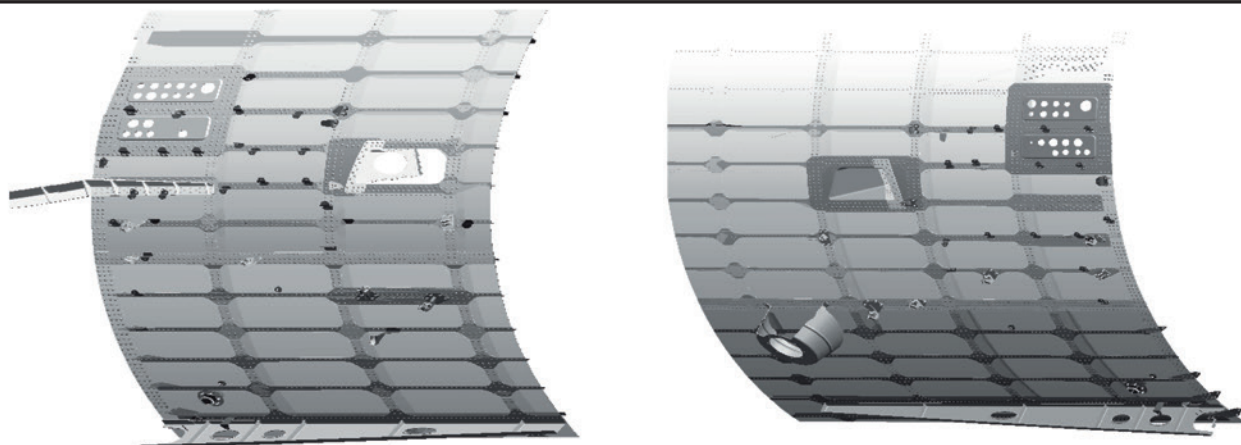


Рис. 3. Технологические зоны по правому и левому борту отсека Ф-2

Отсек Ф-2 также включает технологические зоны в местах крепления: шпангоут 20-24, внутри, ниже пола салона, левый борт; шпангоут 20-24, внутри, ниже пола салона, правый борт; шпангоут 10-19, внутри, ниже пола салона, правый борт; шпангоут 10-24, внутри, выше пола салона, левый борт; шпангоут 10-24, внутри, выше пола салона, правый борт (см. рис. 4).

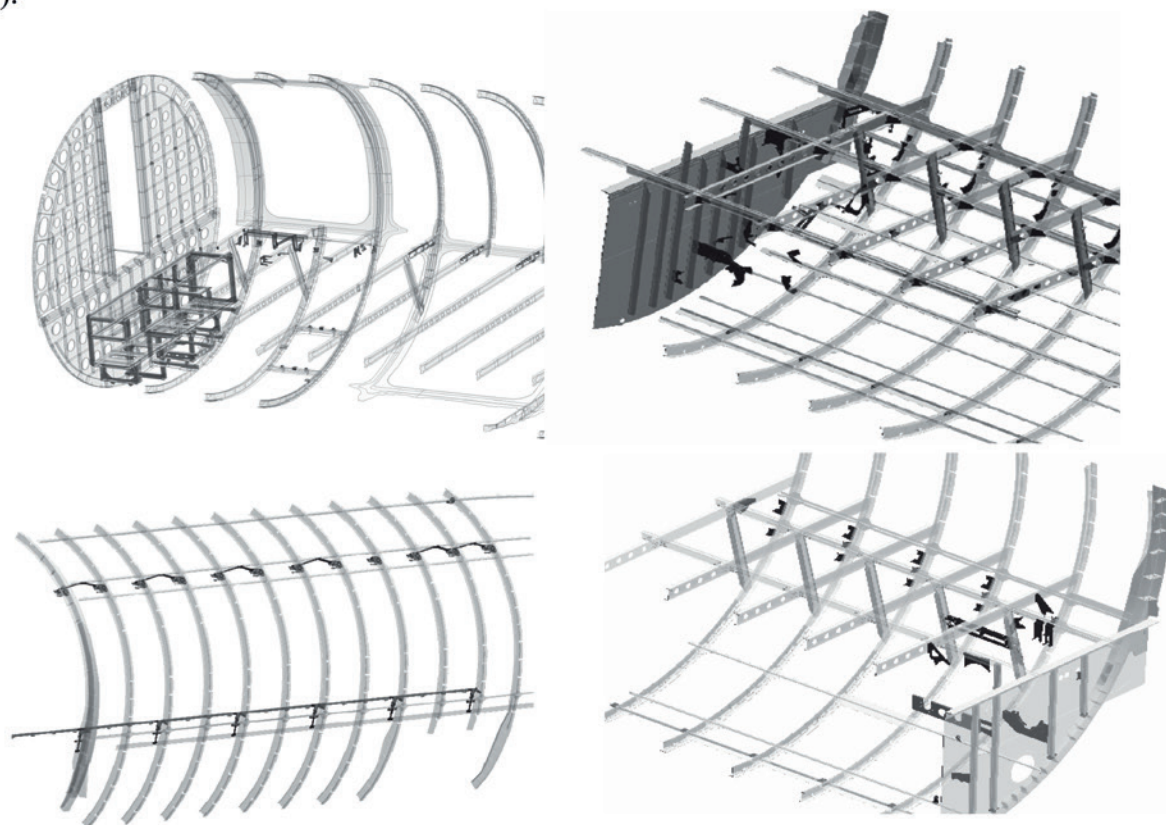


Рис. 4. Примеры технологических зон отсека Ф-2 внутри отсека

Отсек Ф-3 включает технологические зоны установки элементов крепления в месте расположения шпангоутов 24-36, внутри отсека, выше и ниже пола салона, левый и правый борта; в зоне гермоплата, внутри фюзеляжа; ниже панели центроплана (см. рис. 5); в нише основной опоры шасси.

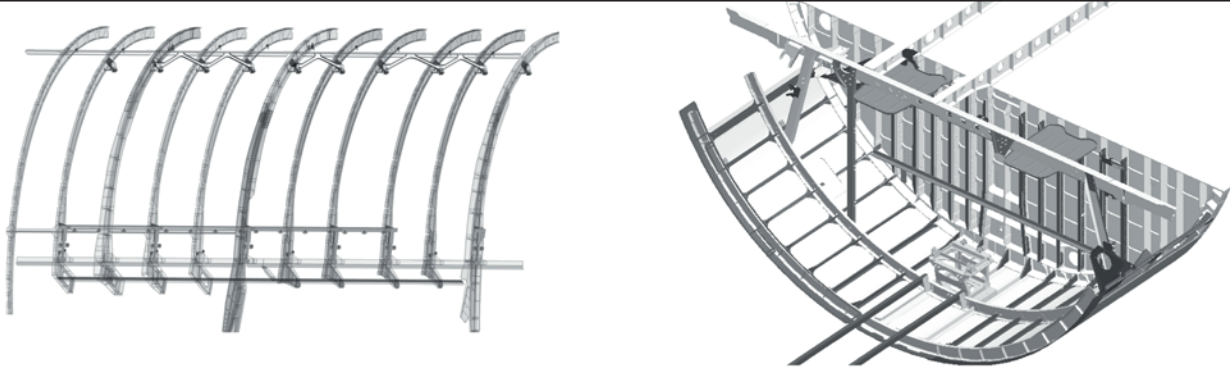


Рис. 5. Примеры технологических зон внутри отсека Ф-3

Отсек Ф-4 включает технологические зоны элементов крепления в месте расположения шпангоутов 36-45, внутри отсека, ниже пола салона, левый и правый борта; в зоне расположения шпангоутов 45-51 внутри, ниже и выше пола салона (см. рис. 6).

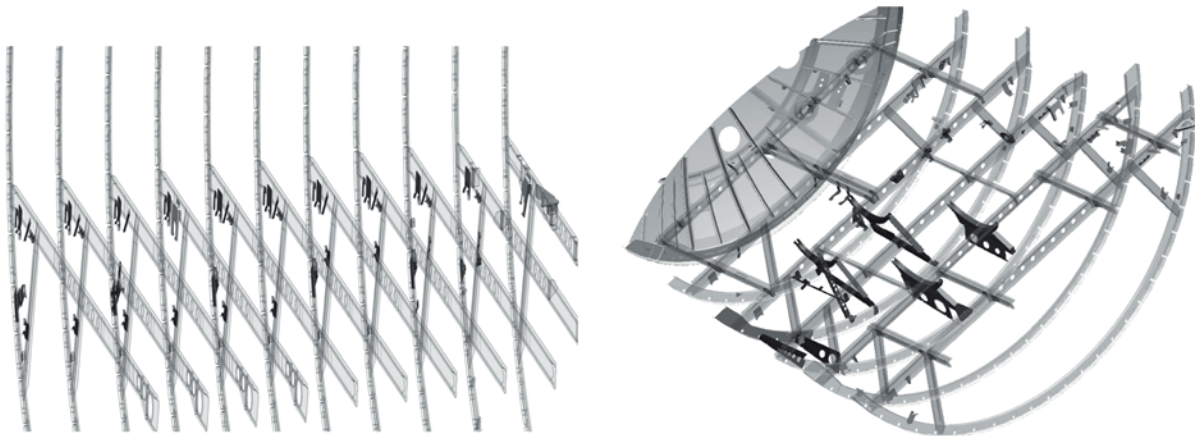


Рис. 6. Примеры технологических зон в отсеке Ф-4

Деление фюзеляжа на технологические зоны позволяет максимально использовать пространство внутри и снаружи фюзеляжа для выполнения работ по установке элементов крепления. К сборке привлекаются большее количество работников для одновременной установки элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа.

В каждой из технологических зон выполняется монтаж элементов крепления различных систем и оборудования, проложенных в данной зоне: например, установка элементов крепления гидросистемы под обтекателем «крыло-фюзеляж», левый и правый борта (см. рис. 7).

Выбор способа установки (базирования) элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа является определяющим фактором, влияющим на качество как установки элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа, так и на выполнение монтажно-сборочных работ на последующей стадии сборки.

При выборе способов базирования элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа необходимо учитывать:

- точность установки элементов крепления систем и оборудования в соответствие с конструкторской документацией;
- трудоёмкость, затраченную на установку элементов крепления систем и оборудования;
- возможность сокращения расходов на изготовление дополнительной оснастки, которые отражаются на себестоимости готовой продукции;

- возможность исключения или максимального снижения человеческого фактора на правильность установки элементов крепления систем и оборудования.

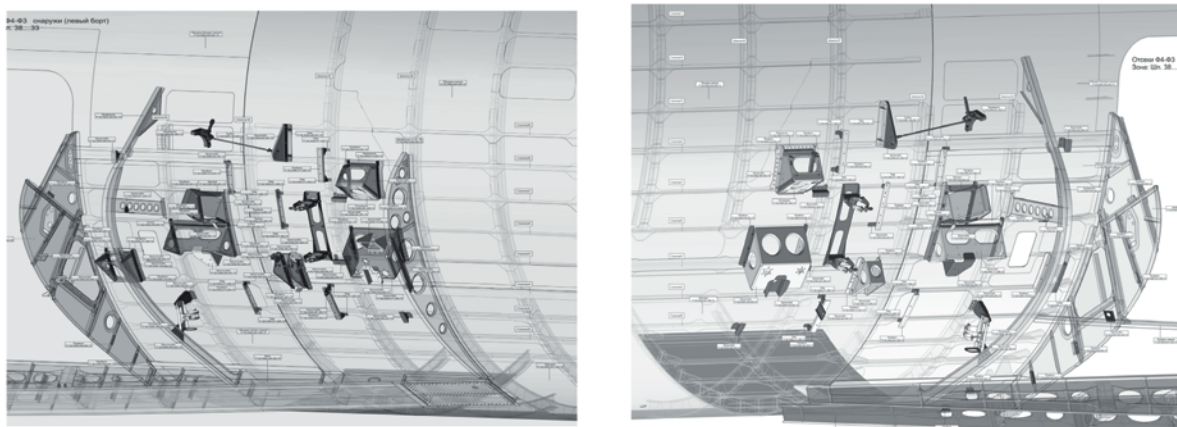


Рис. 7. Примеры установок элементов крепления по отсекам фюзеляжа

В настоящее время применяют несколько способов базирования и установки элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа:

1) выполнение **разметки** под установку элементов крепления систем и оборудования вручную. Этот способ ни по одному из определяющих факторов удовлетворить производство не может, так как налицо:

- увеличенная трудоёмкость при выполнении разметки и дополнительное время для проверки разметки перед установкой элементов крепления систем и оборудования;
- максимальное влияние человеческого фактора на точность и правильность установки элементов крепления систем и оборудования (квалификация сборщика, сложность формы объекта);

2) использование **шаблонов** сверления направляющих отверстий (НО) и сборочных отверстий (СО) в деталях и элементах конструкции. Этот способ позволит повысить точность установки элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа, частично снижает трудоёмкость на выполнение монтажно-сборочных работ, но значительно повышаются расходы на изготовление дополнительной оснастки, которые скажутся на себестоимости продукции;

3) применение **лазерных систем** при установке и монтаже элементов крепления систем и оборудования. Этот способ также обеспечивает высокую точность при установке элементов крепления систем и оборудования в отсеках фюзеляжа относительно элементов каркаса. Но лазерные системы не всегда возможно применить в сложных геометрических формах конструкции фюзеляжа. Кроме того, не исключается использование дополнительной оснастки. Использование лазерных систем также требует дополнительных навыков от персонала, что не может сказаться на временных показателях выполнения операций с применением лазерных систем.

4) выполнение **СО и НО в деталях и элементах конструкции на стадии их изготовления**. В настоящий момент авиационные предприятия имеют на своих производственных площадях высокотехнологичное оборудование, позволяющее выполнять отверстия НО и СО в деталях и элементах конструкции на стадии изготовления деталей с точностью  $\pm 0,1$  мм. Это условие значительно снижает трудоёмкость при выполнении монтажно-сборочных работ и позволяет сократить расходы на изготовление дополнительной оснастки.

Необходимо отметить, что возможно использование второго и третьего способов наряду с четвертым способом для обеспечения наибольшего качества изготовления продукции, но только в отдельных случаях с минимальным их применением.

Используемые технологические паспорта на установки элементов крепления в каждой технологической зоне имеют отдельные сменные задания на предварительную, межоперационную и окончательную установку элементов крепления для каждой из систем.

В качестве конкретных примеров установки и монтажа элементов крепления систем и оборудования в технологической зоне отсека фюзеляжа Ф-2 рассмотрим правый борт. По технологическому паспорту на крепление элементов в этой зоне производятся:

- установка и сборка кронштейнов (клепаются гайки);
- сверловка отверстий по электронной модели (ЭМ) совместно с обшивкой;
- внутришовная герметизация (нанесение подслоя адгезии, нанесение герметика);
- установка деталей на крепёж согласно действующей КД;
- нанесение лакокрасочных покрытий и поверхностная герметизация.

В зоне отсека Ф-2 шпангоут 20-24 правый борт устанавливаются кронштейны крепления систем и оборудования следующих систем:

- установка деталей крепления тросовой проводки согласно ЭМ;
- установка деталей крепления системы подачи воздуха в багажник;
- установка деталей крепления подсистемы подачи воздуха согласно ЭМ;
- установка деталей крепления подсистемы обогрева кухни согласно ЭМ;
- установка проходников.

По технологическому паспорту производятся работы:

- сборка подборок, кронштейнов (клепка);
- сверловка отверстий согласно ЭМ совместно с элементами каркаса;
- внутришовная герметизация (нанесение подслоя адгезии, нанесение герметика) для деталей, ставящихся с внутренней стороны обшивки фюзеляжа;
- установка деталей на крепёж согласно действующей КД;
- нанесение лакокрасочных покрытий и поверхностная герметизация для деталей, ставящихся с внутренней стороны обшивки фюзеляжа.

Из изложенного материала можно отметить, что в настоящее время на внестапельной сборке фюзеляжа сосредоточено большое количество объёмов работ, которые необходимо выполнить до передачи фюзеляжа заказчику согласно техническим условиям на поставку агрегата.

Проанализировав существующую технологию проведения монтажных и крепежных работ на внестапельной сборке фюзеляжа по установке элементов крепления систем и оборудования в отсеках Ф-2, Ф-3, Ф-4, предлагается комплекс мероприятий:

- осуществить передачу большей части объёма работ по установке и монтажу элементов крепления систем и оборудования, которые проводятся на внестапельной сборке фюзеляжа, на внестапельные сборки отсеков фюзеляжа Ф-2, Ф-3, Ф-4;
- произвести частичную передачу объёма работ на более ранние стадии сборки полов пассажирского салона отсеков Ф-2 и Ф-4, панельной сборки обшивок фюзеляжа, сборки секций отсеков Ф-2 и Ф-4.

Это позволит:

- значительно сократить общий производственный цикл внестапельной сборки фюзеляжа;
- уменьшить трудоёмкость работ на внестапельной сборке фюзеляжа не менее чем на 15-25 %;
- улучшить условия труда и обеспечить наилучший подход при установке и монтаже элементов крепления систем и оборудования:
- максимально использовать имеющиеся производственные площади, уменьшая цикл внестапельной сборки фюзеляжа;
- значительно сократить расходы на изготовление дополнительной оснастки при монтаже элементов крепления при внестапельной сборке фюзеляжа;

- уменьшить дефицит входящих деталей для внестапельной сборки фюзеляжа в целом за счет передачи работ на отдельные отсеки фюзеляжа. Это увеличит мобильность, гибкость групп опережения для изготовления деталей и их подачи на сборку фюзеляжа.

После передачи объема работ с внестапельной сборки фюзеляжа на внестапельные сборки отсеков Ф-2, Ф-3, Ф-4 на внестапельной сборке фюзеляжа останется незначительная часть монтажных работ по элементам крепления от общей массы элементов крепления систем и оборудования.

Например, останутся такие операции, как установка элементов крепления систем и оборудования после стыковки фюзеляжа (районы стыков отсеков фюзеляжа Ф-1-Ф-2, Ф-2-Ф-3, Ф-3-Ф-4; Ф-4; Ф-5).

Как пример, сравним существующий объем работ по технологической зоне отсека Ф-2 – шпангоут 10-19, правый борт, ниже пола салона и предлагаемый. Из этой технологической зоны для установки на внестапельной сборке фюзеляжа предлагается оставить деталь STANDOFF WSI-332-5 – 2 шт. (см. рис. 8).

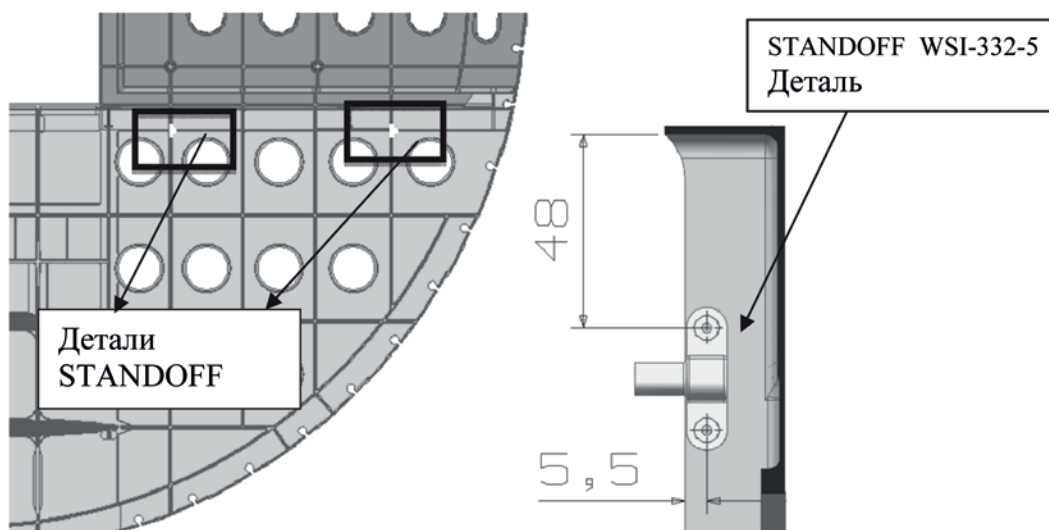


Рис. 8. Вид на шпангоут 10 по полету, правый борт

Также пример в технологической зоне отсека Ф-2 – нижняя панель отсека Ф-2 и шпангоут 24, изнутри. Из этой технологической зоны для установки на внестапельной сборке фюзеляжа предлагается оставить деталь STANDOFF WSI-332-5/A – 3 шт. (см. рис. 9).

Предлагаемая передача объема работ по технологической зоне отсека Ф-2 – шпангоут 20-24, правый борт, ниже пола салона позволит оставить в этой технологической зоне девять деталей элементов крепления (для установки на внестапельной сборке фюзеляжа).

Целесообразно в полном объеме оставить на внестапельной сборке фюзеляжа технологические зоны отсека Ф-2 – правый и левый борт **снаружи**. Это необходимо для исключения возможности нанесения механических повреждений при транспортировке отсека Ф-2 к стенду стыковки фюзеляжа.

Из всех технологических зон для установки на внестапельной сборке фюзеляжа останутся 113 деталей.

По предлагаемому варианту для установки на внестапельной сборке фюзеляжа из всех технологических зон отсека Ф-2 из **500** деталей останутся **150**. Это говорит о том, что примерно 70 % деталей передаются на внестапельную сборку отсека Ф-2 фюзеляжа.

Естественно, что при передаче объема работ на сборку отсеков (по выполнению установки и монтажа элементов крепления систем и оборудования) необходимо будет решать и вопросы перепланировки производственных площадей цехов сборки отсеков и цеха общей сборки фюзеляжа.

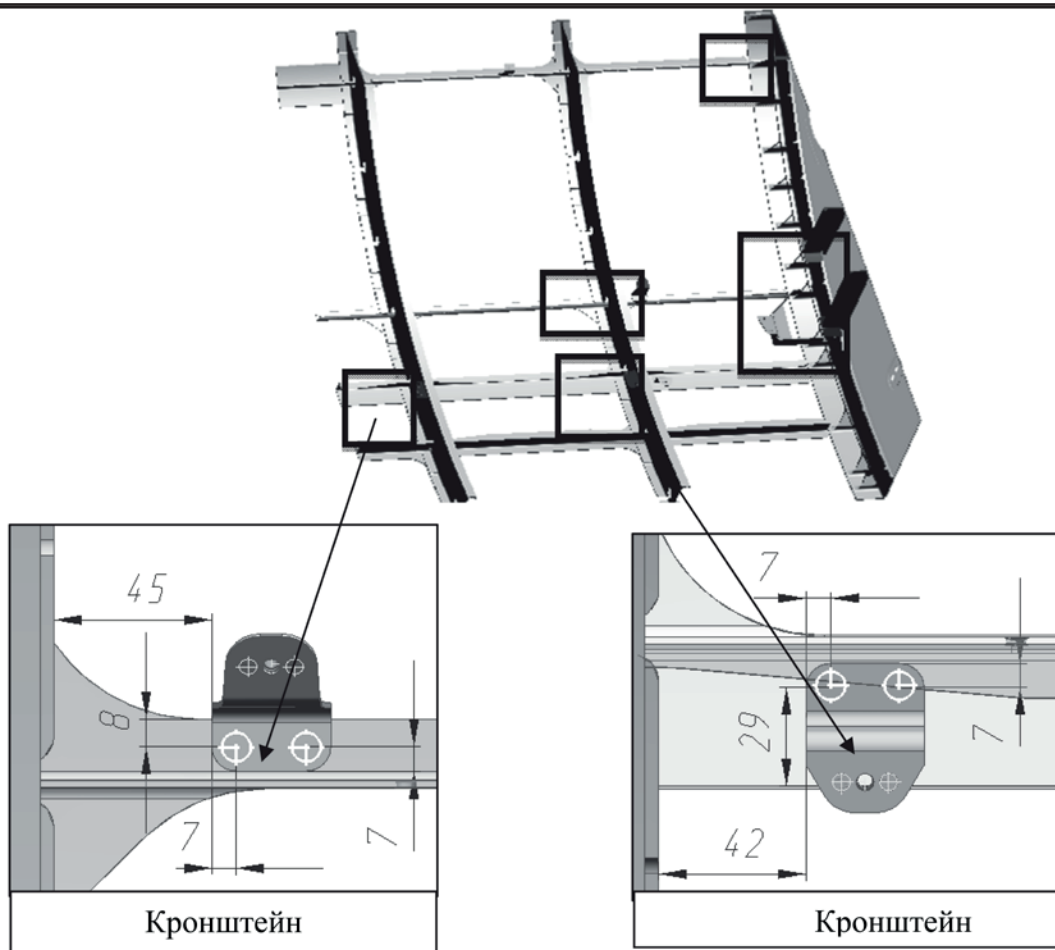


Рис. 9. Вид на нижнюю панель отсека Ф-2 и шпангоут 24, изнутри

Перепланировки производственных площадей будут необходимы и при передаче части объёмов работ и при сборке отсеков Ф-2, Ф-3, Ф-4.

В связи с передачей объема работ на отсеки Ф-2, Ф-3, Ф-4 и уменьшением работ на общей внестапельной сборке фюзеляжа необходимо будет перераспределить площади и в первую очередь организовать дополнительные участки для производства внестапельных работ на отсеках фюзеляжа.

В этом случае время нахождения отсеков на внестапельной сборке будет увеличено. Но работы по монтажу элементов крепления систем и оборудования позволят значительно уменьшить цикл внестапельных работ на состыкованном фюзеляже.

При организации такого процесса необходимо помнить, что ни в коем случае не рекомендуется увеличивать трудоемкость общего процесса сборки фюзеляжа, так как этот фактор характеризует увеличение (наращивание) темпов производства в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гусева, Р. И. Особенности технологии сборки планера самолета: учеб. пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 133 с.
- 2 Современные технологии авиастроения / колл. авт.; под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 532 с.
- 3 Гусева, Р. И. К вопросу расчета точности сборки узлов и агрегатов / Р. И. Гусева / Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Наука о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 16-22.

**Соловьёв В. А., Сухоруков С. И., Чёрный С. П., Попова В. С.**  
**V. A. Solovyev, S. I. Sukhorukov, S. P. Cherniy, V. S. Popova**

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ПРОВОДАХ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА**

**PARAMETER ESTIMATION OF ICE COVER DESTRUCTION ON THE WIRE  
TRANSMISSION LINE ACCORDING TO THE RESULTS OF NUMERICAL  
EXPERIMENTS**

**Соловьёв Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav A. Solovyev** – Doctor in Engineering, Professor, Head of Electrical drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Сухоруков Сергей Иванович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Партизанская 15/1-3. E-mail: sergei.svan@gmail.com.

**Mr. Sergei I. Sukhorukov** – postgraduate student, Electrical drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 681000, Komsomolsk-on-Amur, 15/1-3, Partizanskaya Str. E-mail: sergei.svan@gmail.com.

**Чёрный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Mr. Sergei P. Cherniy** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: kepapu@knastu.ru.

**Попова Валерия Сергеевна** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: valeriya.guzhvina93@gmail.com.

**Ms. Valeriya S. Popova** – student of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: valeriya.guzhvina93@gmail.com.

**Аннотация.** В статье представлено исследование границ удаления гололёда с проводов ЛЭП при применении электродинамического способа. С помощью численного эксперимента исследовано влияние различных параметров ЛЭП на параметры импульсов тока. Определены параметры импульсов тока, при которых начинается разрушение ледяного покрова, и допустимые рабочие области. Рассчитаны наименее энергозатратные режимы удаления. Получены интегральные зависимости изменения таких режимов при различных параметрах ЛЭП. Показано, что во всех исследованных случаях рабочие параметры лежат в допустимых областях.

**Summary.** The article presents the research of the ice crust removal from transmission line wires when using electrodynamic method. A numerical experiment helps investigate various parameters impact of the transmission line on current pulse parameters. The current pulse parameters when the destruction of the ice cover begins are identified. The less energy consuming modes of removal are defined. Integral dependence of such modes of transmission lines with different parameters are obtained. It is shown that in all the cases studied, the operating parameters are within the permissible areas.

**Ключевые слова:** ЛЭП, удаление гололёда, электродинамический способ, численный эксперимент, компьютерное моделирование.

**Key words:** transmission lines, ice crust removal, electrodynamic method, numerical experiment, computer modeling.

УДК 004.942

### **Введение**

В настоящее время самым распространённым способом передачи энергии на большие расстояния является использование воздушных линий электропередач (ЛЭП). При использовании ЛЭП в зимнее время возникает проблема образования гололёда на проводах, приводящего к повышению механических нагрузок на линию и возникновению аварий и обрывов проводов [1]. Особенно актуальна описанная проблема в северных регионах с высокой влажностью, ветрами и перепадами температур воздуха.

В качестве одного из способов решения данной проблемы был предложен новый электродинамический способ удаления обледенения с проводов линий электропередач [2]. Проведение экспериментального исследования на реальной ЛЭП недопустимо и связано с большими энергетическими и финансовыми затратами, поэтому для исследования предложенного способа была разработана математическая модель колебаний провода под действием периодической силы Ампера в плоскости действия вынуждающей нагрузки [3, 4].

При разработке модели учитывались следующие допущения:

- провод с гололёдом, натянутый в пролёте, представлен в виде шарнирно опёртого стержня с очень малой изгибной жёсткостью;
- гололёд представлен в виде полого цилиндра льда с постоянной толщиной стенки [5];
- при решении дифференциальных уравнений при построении модели использовался метод Бубнова-Галеркина;
- для решения кубического уравнения при расчётах на модели использовался численный метод Виета-Кардано;
- основными видами разрушающего воздействия в процессе очистки при такой постановке задачи являются изгибные напряжения и растягивающие напряжения.

Входными параметрами модели являются:

- длина пролёта ЛЭП;
- диаметры и количество алюминиевых и стальных проволок в проводе;
- внешний диаметр провода;
- толщина стенки гололёда;
- частота и амплитуда импульсов тока.

Результатами расчёта на модели являются:

- величина амплитуды колебаний провода;
- величины изгибных напряжений;
- величины растягивающих напряжений.

Все результаты расчётов представляются графически в виде набора поверхностей, отражающих зависимость амплитуды колебаний провода  $A$ , величины изгибных напряжений  $\sigma_{изгЛ}$  и величины растягивающих напряжений  $\sigma_{растЛ}$  от различных амплитуд  $I$  и частот  $\theta$  подаваемых в линию импульсов.

Целями проведённого исследования являлись определение границ начала разрушения ледяного покрова при применении электродинамического способа на проводах, а также оценка областей недопустимых аварийных режимов при учёте чисто механических факторов на разработанной математической модели. Исследование проводилось в виде серии вычис-

лительных экспериментов. При проведении экспериментов считалось, что на проводе образовался монолитный чистый лёд с плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$ .

### Методика проведения эксперимента

Для выявления закономерностей разрушения гололёда на проводах ЛЭП варьированию подвергались три основных параметра: длина пролёта, толщина стенки гололёда и сечение провода.

В первом случае во входных параметрах модели происходило пошаговое изменение длины пролёта (всего пять различных значений), остальные параметры оставались неизменными. Для каждой из длин рассчитывались зависимости амплитуд колебаний провода, величин изгибных напряжений и величин растягивающих напряжений от амплитуды и частоты подаваемых в линию импульсов. Далее определялись сочетания параметров «частота – амплитуда импульсов», при которых начинается разрушение льда, и области аварийных режимов, при которых происходит перехлест проводов. По полученным результатам находились точки с минимальными амплитудами импульсов тока, определяющие наиболее энергоэффективные режимы очистки.

Во втором случае во входных параметрах модели происходило пошаговое изменение толщины льда (всего пять различных значений), остальные параметры оставались неизменными. Дальнейшие расчёты проводились аналогично предыдущему случаю.

В третьем случае во входных параметрах модели происходило изменение сечения провода (всего четыре различных значения, выбранные из наиболее широко используемых проводов), остальные параметры оставались неизменными. Дальнейшие расчёты проводились аналогично предыдущим случаям.

При исследовании на модели было выявлено, что величина изгибных напряжений, действующих на провод, не достигает предела прочности льда, поэтому при разрушении льда они носят только вспомогательный характер, а основное воздействие оказывают растягивающие напряжения. Поэтому при проведении исследования основное внимание было уделено параметрам растягивающих напряжений. Результаты исследования приведены на рис. 1-3, 5-7, 9-11.

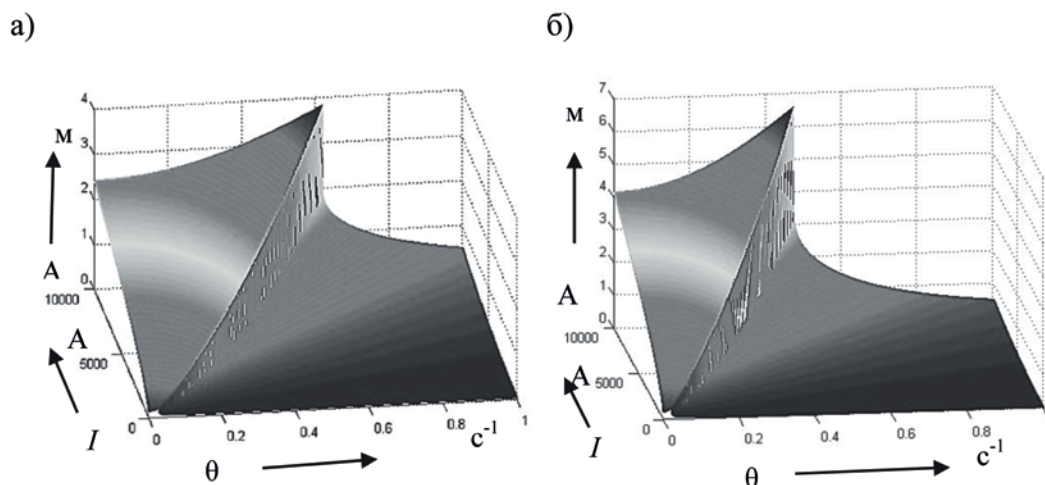


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока при различных длинах пролёта: а – для длины пролёта 160 м; б – для длины пролёта 240 м

При исследовании влияния длины пролёта были выбраны пять значений наиболее типичных длин пролётов (160, 180, 200, 220 и 240 м). Для каждого значения длины пролёта с использованием математической модели были рассчитаны зависимости амплитуд колебаний и напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при

заданной длине пролёта. Зависимость амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока для случаев 160 и 240 м приведена на рис. 1. Зависимость величины напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока для тех же длин пролёта приведена на рис. 2.

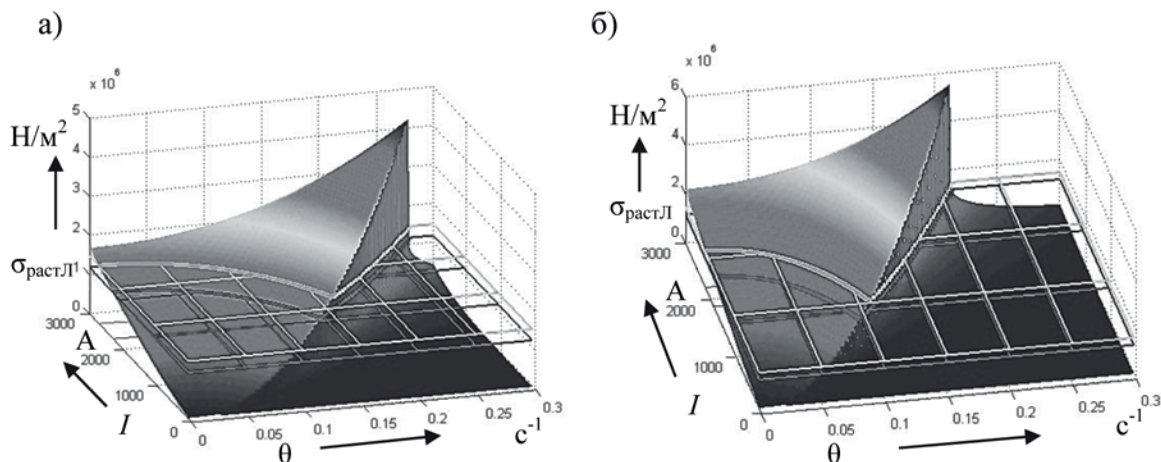
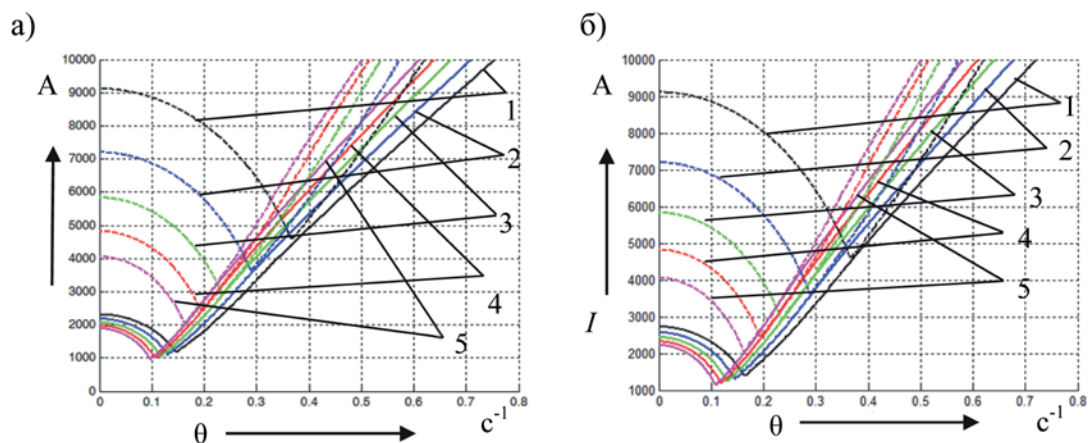


Рис. 2. Зависимость величины напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при различных длинах пролёта:  
 а – для длины пролёта 160 м; б – для длины пролёта 240 м

На рис. 3 показано семейство зависимостей пар значений амплитуды и частоты тока, при которых растягивающее напряжение превышает прочность льда и при этом не происходит схлестывания проводов (для двух случаев: при температуре  $-5$  и  $-10$  °C).

Сплошными линиями на рис. 3 показаны зависимости амплитуд импульсов тока от частоты при различных длинах пролёта, пунктирными линиями – зависимости значений величин импульсов тока и частот, при которых амплитуда колебаний провода равна половине расстояния между проводами.



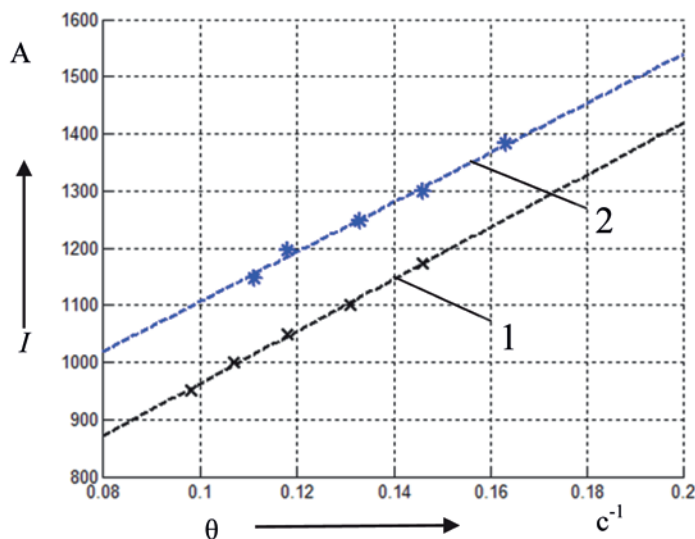
1 – для длины пролёта 160 м; 2 – для длины пролёта 180 м; 3 – для длины пролёта 200 м;  
 4 – для длины пролёта 220 м; 5 – для длины пролёта 240 м

Рис. 3. Зависимость величины импульсов тока от частоты при различных длинах пролёта:  
 а – при температуре  $-5$  °C; б – при температуре  $-10$  °C

Допустимыми режимами работы являются случаи, когда амплитуда колебаний провода меньше половины расстояния между проводами, т.е. когда сплошная линия проходит ниже соответствующей пунктирной.

При построении интегральной кривой, приведённой на рис. 4, отражающей зависимость амплитуды импульсов тока от частоты, в качестве базовых параметров использовались параметры, обеспечивающие минимум энергозатрат, необходимых для начала процесса разрушения льда. Этим параметрам отвечают точки на графиках (см. рис. 3) с минимальной амплитудой импульсов.

На рис. 4 приведены интегральные зависимости координат минимальной величины импульсов тока от длины пролёта для двух случаев (при температуре  $-5$  и  $-10$  °C), а также общий вид зависимости координат этой точки от длины пролёта.



1 – при температуре  $-5$  °C; 2 – при температуре  $-10$  °C  
 Рис. 4. Зависимость координат минимальной величины импульсов тока от длины пролёта

Как видно из кривых, приведённых на рис. 3 и 4, с увеличением длины пролёта амплитуда и частота импульсов тока, при которых растягивающее напряжение превышает прочность льда, уменьшаются. Все рабочие значения параметров импульсов тока для исследованных длин пролёта находятся за пределами области, в которой произойдёт перехлест проводов, т.е. лежат в допустимой рабочей области. При этом зависимость величины тока от частоты является линейной функцией.

При исследовании влияния толщины гололёда было выбрано пять значений наиболее типичных толщин гололёда (5, 10, 15, 20 и 25 мм).

Для каждого значения толщины льда с использованием математической модели были рассчитаны зависимости амплитуд колебаний и напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при заданной толщине льда. Зависимости амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока для случаев 5 и 25 мм приведены на рис. 5. Зависимость величины напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока для тех же случаев приведена на рис. 6.

На рис. 7 показаны семейства кривых, отражающих зависимость пар значений величины и частоты тока, при которых растягивающее напряжение превышает прочность льда и при этом не происходит схлёстывания проводов (для двух случаев: при температуре  $-5$  и  $-10$  °C).

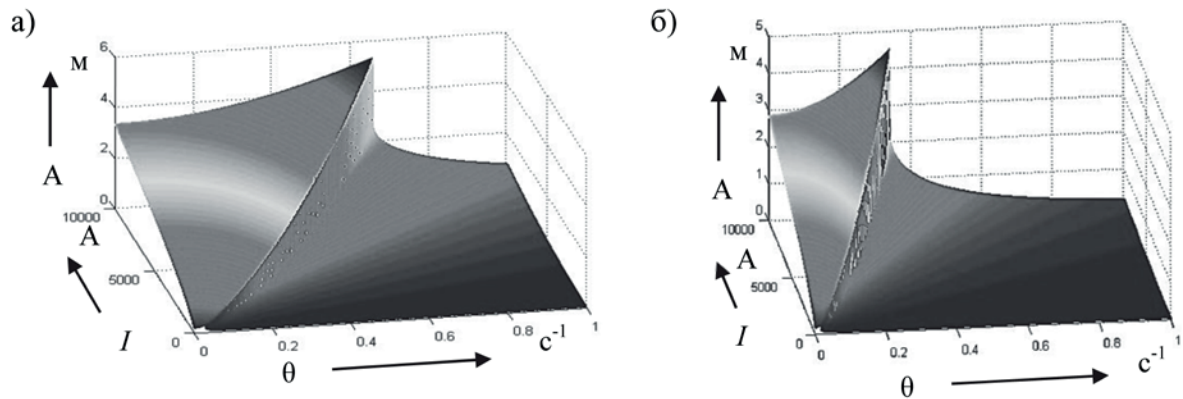


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока при различных толщинах льда: а – для толщины гололёда 5 мм; б – для толщины гололёда 25 мм

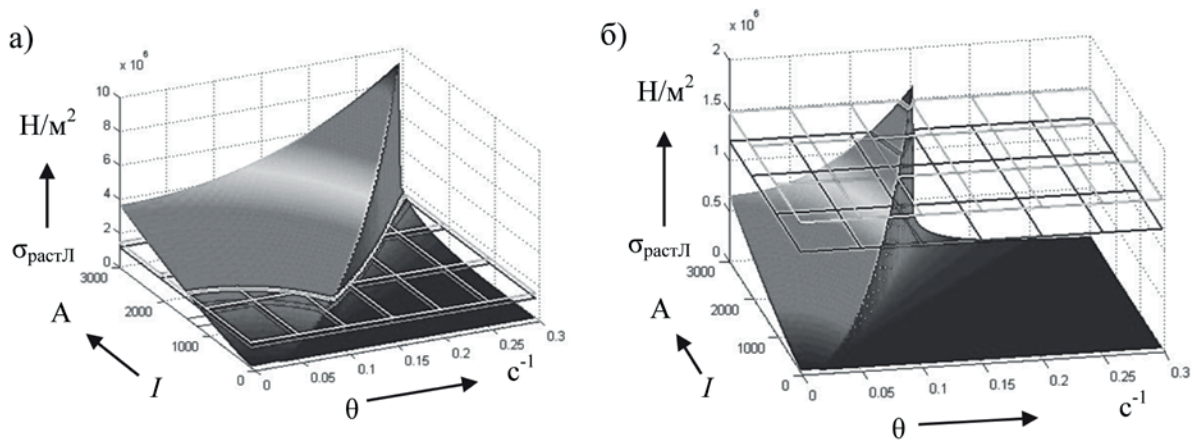
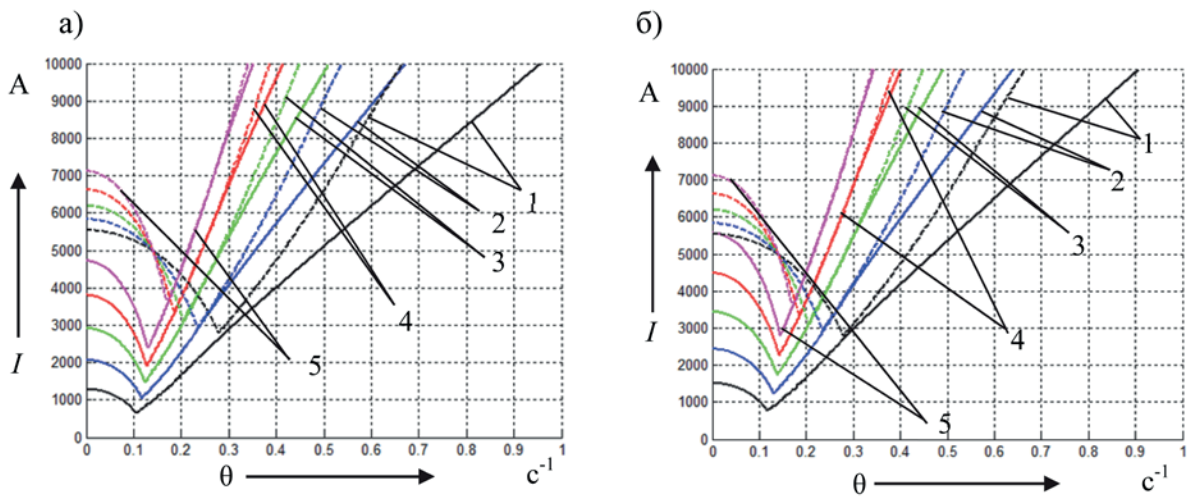


Рис. 6. Зависимость величины напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при различных толщинах льда: а – для толщины льда 5 мм; б – для толщины льда 25 мм



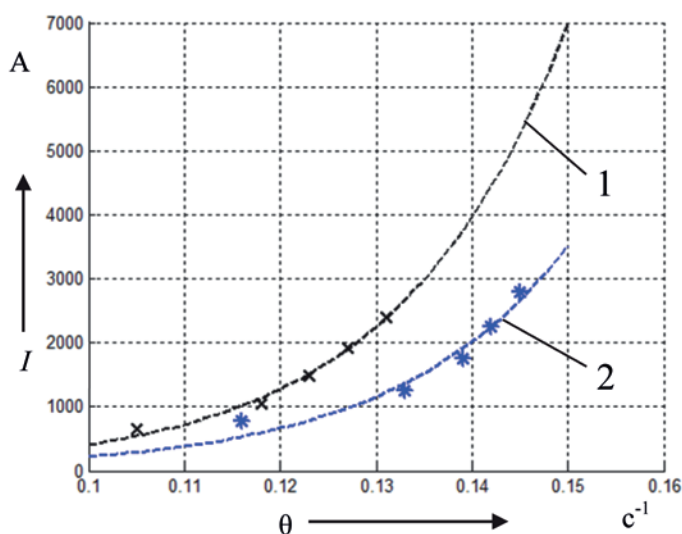
1 – для толщины льда 5 мм; 2 – для толщины льда 10 мм; 3 – для толщины льда 15 мм; 4 – для толщины льда 20 мм; 5 – для толщины льда 25 мм

Рис. 7. Зависимость величины импульсов тока от частоты при различных толщинах льда: а – при температуре  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б – при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сплошными линиями на рис. 7 показаны зависимости величин импульсов тока от частоты при различных значениях толщины образовавшегося гололёда, пунктирными линиями – зависимости значений величин импульсов тока и частот, при которых амплитуда колебаний провода равна половине расстояния между проводами.

Допустимыми режимами работы являются случаи, когда амплитуда колебаний провода меньше половины расстояния между проводами, т.е. когда сплошная линия проходит ниже соответствующей пунктирной.

На рис. 8 приведены интегральные кривые, отражающие зависимость координат минимальной величины импульсов тока от толщины льда (при температуре в  $-5$  и  $-10$  °C), а также общий вид зависимости координат этой точки от значений толщин льда.



1 – при температуре  $-5$  °C; 2 – при температуре  $-10$  °C  
Рис. 8. Зависимость координат минимальной величины импульсов тока от толщины льда

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины льда величина и частота импульсов тока, при которых растягивающее напряжение превышает прочность льда, увеличиваются. Все значения параметров импульсов тока для исследованных толщин льда находятся в пределах допустимой рабочей области. Зависимость величины тока от частоты становится нелинейной – носит ярко выраженный экспоненциальный характер.

При исследовании влияния сечения провода на процесс удаления гололёда были выбраны четыре наиболее распространённых провода марки АС: 95/16, 120/19, 150/24, 185/29.

Для каждого из выбранных сечений провода с использованием математической модели были рассчитаны зависимости амплитуд колебаний и напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при заданном сечении провода. Зависимости амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока для случаев 95/16 и 185/29 приведены на рис. 9. Зависимости величин напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока для тех же случаев приведены на рис. 10.

На рис. 11 показаны интегральные кривые, отражающие зависимость координат минимальной величины импульсов тока от толщины льда, при которых растягивающее напряжение превышает прочность льда и при этом не происходит схлёстывания проводов (для двух случаев: при температуре  $-5$  и  $-10$  °C).

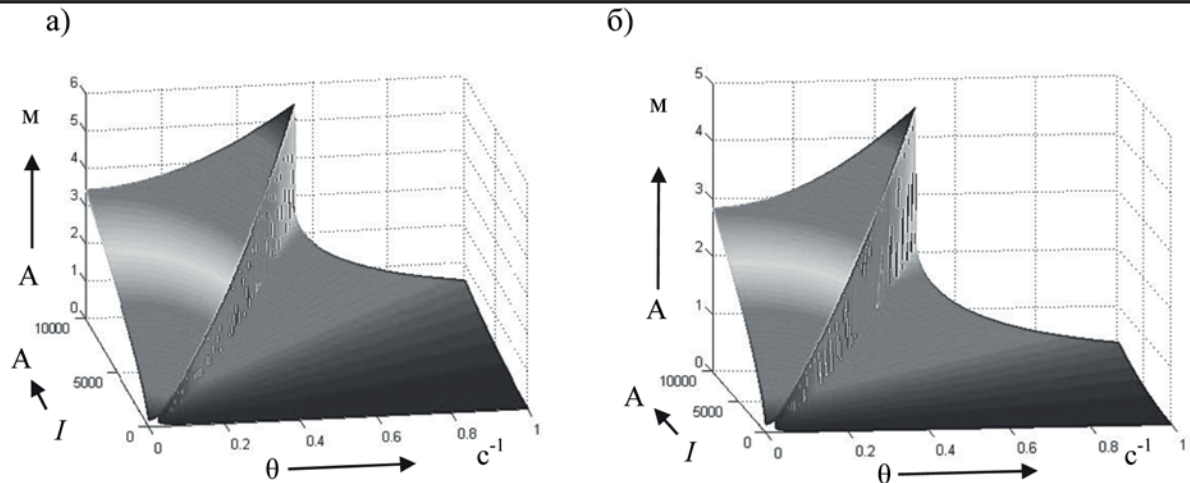


Рис. 9. Зависимость амплитуды колебаний провода от частоты и величины импульсов тока при различных типах провода:  
 а – для сечения провода 95/16; б – для сечения провода 185/29

Сплошными линиями на рис. 11 показаны зависимости величин импульсов тока от частоты при различных типах провода, пунктирными линиями – зависимости значений величин импульсов тока и частот, при которых амплитуда колебаний провода равна половине расстояния между проводами.

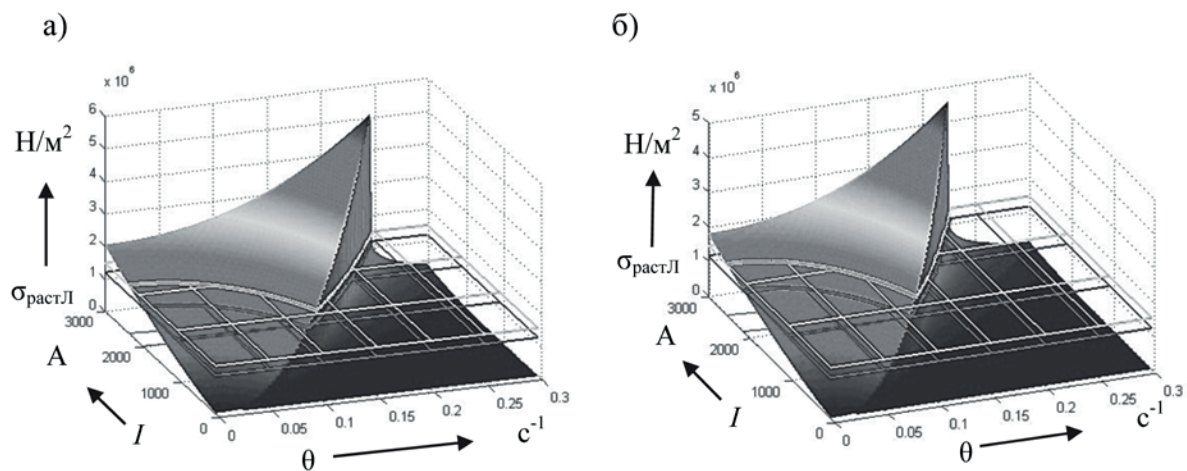
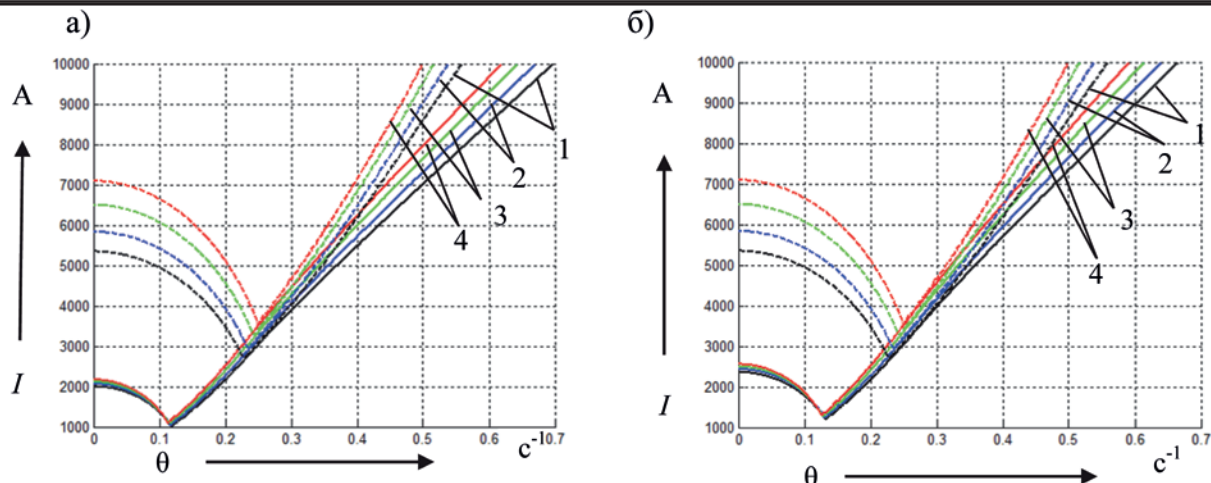


Рис. 10. Зависимость величины напряжений, возникающих при растяжении, от частоты и величины импульсов тока при различных типах провода:  
 а – для сечения провода 95/16; б – для сечения провода 185/29

Допустимыми режимами работы являются случаи, когда амплитуда колебаний провода меньше половины расстояния между проводами, т.е. когда сплошная линия проходит ниже соответствующей пунктирной.

Все значения параметров импульсов тока для исследованных сечений провода лежат в пределах допустимой рабочей области.



1 – для сечения провода 95/16; 2 – для сечения провода 120/19;  
3 – для сечения провода 150/24; 4 – для сечения провода 185/29

Рис. 11. Зависимость величины импульсов тока от частоты при различных типах провода: а – при температуре  $-5^\circ C$ ; б – при температуре  $-10^\circ C$

В табл. 1 и 2 приведены полученные параметры импульсов тока, обеспечивающие минимум энергозатрат на проведение очистки, при температурах  $-5$  и  $-10^\circ C$ .

Таблица 1

Параметры импульсов тока, обеспечивающие минимум энергозатрат на проведение очистки, при различных сечениях провода для температуры  $-5^\circ C$

Параметры	Провод			
	АС 95/16	АС 120/19	АС 150/24	АС 185/29
Частота импульсов тока, $c^{-1}$	0.118	0.118	0.114	0.114
Амплитуда импульсов тока, А	1015.9	1049.2	1093.6	1099.3

Таблица 2

Параметры импульсов тока, обеспечивающие минимум энергозатрат на проведение очистки, при различных сечениях провода для температуры  $-10^\circ C$

Параметры	Провод			
	АС 95/16	АС 120/19	АС 150/24	АС 185/29
Частота импульсов тока, $c^{-1}$	0.133	0.133	0.128	0.128
Амплитуда импульсов тока, А	1199.2	1248.2	1268.1	1298.8

Анализ полученных значений показывает, что при увеличении сечения провода, используемого в линии, требуемая частота импульсов незначительно снижается. Основное влияние изменение сечения провода оказывает на требуемую минимальную амплитуду импульсов тока.

### Выводы

В результате проведённого исследования процесса удаления гололёда с проводов ЛЭП при использовании электродинамического способа на разработанной модели было установлено, что основное влияние на процесс разрушения льда из двух учитываемых факторов оказывает только одна составляющая – растягивающие напряжения, возникающие во льду.

Принятый при разработке модели подход позволяет чётко определить границы разрушения гололёда в рамках принятых допущений и ограничений эксплуатации ЛЭП.

Получены интегральные зависимости параметров импульсов тока, обеспечивающие минимум расхода энергии, при которых происходит удаление льда. Полученные зависимости показали, что изменение длины пролёта влияет на наиболее энергоэффективное сочетание «амплитуда – частота импульсов» линейным образом. При увеличении длины пролёта уменьшается собственная частота колебаний провода, натянутого в пролёте, что приводит к снижению необходимой частоты импульсов. Одновременно для получения аналогичных амплитуд колебаний провода достаточно приложения меньших усилий, что приводит к снижению необходимой амплитуды импульсов тока.

Увеличение толщины стенки гололёда приводит к экспоненциальному изменению координат наиболее энергоэффективного сочетания «амплитуда – частота импульсов». Такой характер изменения связан с квадратичным изменением массы льда при линейном изменении толщины стенки гололёда.

Изменение сечения провода слабо влияет на собственную частоту колебаний провода, натянутого в пролёте, поэтому основное влияние оказывается на его массу. При увеличении массы возрастает энергия, необходимая для перемещения провода, что приводит к росту необходимых амплитуд импульсов тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков, С. И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьёв, К. Е. Костин // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3 (41). – С. 148-158.
2. Пат. 2442256 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / В. М. Козин, В. А. Соловьёв, Д. А. Орлов, С. И. Сухоруков, К. С. Малых; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет». – № 2010144485/07; заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012. Бюл. № 4. – 4 с.
3. К вопросу о разработке математической модели вынужденных колебаний обледеневшего провода под действием периодически возникающей силы Ампера / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьёв, Д. А. Орлов, В. М. Козин // Вестник приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2013. – № 2 (13). – С. 85-89.
4. Сухоруков, С. И. Математическая модель вынужденных колебаний провода ЛЭП в плоскости действия периодической нагрузки / С. И. Сухоруков // Молодые учёные – Хабаровскому краю. – 2013. – Т. 2. – С. 221-225.
5. Глухов, В. Г. Метеорологические условия образования гололёда на высотных сооружениях / В. Г. Глухов. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 100 с.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА  
MATHEMATICS AND MECHANICS

**Хохлов Н. А., Калугина Н. А., Чжо Аунг Хеин**  
**N. A. Khokhlov, N. A. Kalugina, Kyaw Aung Hein**

**РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ  
ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ЧИСЛА СВЯЗАННЫХ ВОЛН**

**SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF QUANTUM SCATTERING THEORY  
FOR AN ARBITRARY NUMBER OF BOUND WAVES**

**Хохлов Николай Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Mr. Nikolay A. Khokhlov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Av. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Калугина Наталья Анатольевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Ms. Natalia A. Kalugina** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Av. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Чжо Аунг Хеин** – аспирант кафедры «Физика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: kof@knastu.ru.

**Mr. Kyaw Aung Hein** – Postgraduate student, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Av. E-mail: kof@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе представлен метод решения обратной задачи квантовой теории рассеяния для определения потенциала взаимодействия частиц из экспериментальных данных по рассеянию для случая трех связанных парциальных волн. В решении задачи используется уравнение Марченко и аппроксимация Паде для элементов S-матрицы. Показано, что разработанный ранее метод аппроксимации для случая взаимодействия двух волн применим для трех и более связанных волн.

**Summary.** This paper presents a method for solving the inverse problem of quantum scattering theory to determine the interaction potential of particles from the experimental scattering data related to the case of three partial waves. Marchenko' equation and Pade's approximation for the S-matrix elements are used for solving the problem. It is shown that the approximation method, developed earlier for the case of interaction between two waves, is suitable for three or more bound waves.

**Ключевые слова:** уравнение Марченко, S-матрица, аппроксимация, потенциал взаимодействия, теория рассеяния, фазовые сдвиги, обратная задача, связанные волны, унитарность матриц.

**Key words:** Marchenko's equation, S-matrix approximation, the interaction potential, scattering theory, phase shifts, the inverse problem, bound waves, unitary property of matrices.

УДК 538.171.11

В последние годы проводятся интенсивные исследования в области обратных задач в различных направлениях. Поскольку ранее основные результаты были получены для одномерных и одноканальных обратных задач, то теперь большой интерес представляют более

сложные системы, а именно многоканальные, многомерные и многочастичные. Настоящая работа посвящена решению обратной задачи квантовой теории рассеяния, т.е. восстановлению потенциала взаимодействия между частицами по данным рассеяния. Следует отметить, что методы, применяемые при решении обратных задач в различных областях, часто аналогичны. В других аналогичных задачах потенциалу могут соответствовать такие характеристики, как плотность, показатель преломления, магнитная и электрическая проницаемости среды и т.п.

Ранее нами был разработан аналитический метод решения обратной задачи квантовой теории рассеяния в случае двух связанных парциальных волн (каналов рассеяния) [6]. Решение обратной задачи рассеяния позволяет по результатам фазового анализа данных рассеяния (по измеренным значениям S-матрицы) рассчитать потенциал взаимодействия между двумя частицами. Этот метод основан на использовании уравнения Марченко [3] и аппроксимации Паде [1] для элементов матрицы рассеяния (S-матрицы). S-матрица – это унитарная симметричная матрица размерностью  $L \times L$ , где  $L$  – число связанных волн. Нами было показано, что разработанный метод в принципе обобщается на случай произвольного числа связанных парциальных волн, однако для такого обобщения необходимо построить аппроксимацию Паде общего вида для унитарной симметричной матрицы произвольной размерности [6]. Следует отметить, что такая аппроксимация может быть удобна в других областях физики и техники, где используются унитарные симметричные матрицы. В частности, симметричные унитарные матрицы описывают рассеивающие свойства не имеющих потерь соединений волноводов [4]. В литературе имеется аппроксимация Паде элементов симметричной унитарной матрицы только для простейшего случая  $L = 2$  [2]. В настоящей работе мы указываем на способ такой аппроксимации для  $L > 2$  и представляем явно такую аппроксимацию для случая  $L = 3$ . Следовательно, получаем метод определения потенциала взаимодействия частиц из экспериментальных данных по рассеянию для случая трех связанных парциальных волн.

Обычная параметризация S-матрицы имеет вид произведения экспонент

$$S = e^{\delta_N} e^{\varepsilon_N} e^{\delta_N},$$

для трехканального случая  $\delta_N$  и  $\varepsilon_N$  они представляют собой матрицы

$$\delta_N = i \begin{pmatrix} \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_N = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} & 0 & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Нетрудно получить экспоненту от матрицы (1):

$$e^{\delta_N} = \begin{pmatrix} e^{\delta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\delta_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\delta_3} \end{pmatrix}.$$

Чтобы найти экспоненту от матрицы (2), запишем ее в виде

$$\varepsilon_N = P_1 \lambda_1 + P_2 \lambda_2 + P_3 \lambda_3,$$

где  $P_i$  – матрицы-проекторы;  $\lambda_i$  – собственные значения матрицы (2).

Матрицы-проекторы  $P_i$  обладают следующими свойствами:

$$P_i^2 = P_i, \quad P_i P_j = 0, \quad i \neq j,$$

тогда для  $e^{\varepsilon_N}$  получаем

$$e^{\varepsilon_N} = P_1 e^{\lambda_1} + P_2 e^{\lambda_2} + P_3 e^{\lambda_3}.$$

Собственные значения  $\lambda_i$  находим из уравнения

$$\lambda^3 + 4\rho\lambda + 16i\gamma = 0,$$

где  $\rho = \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2$ ,  $\gamma = \varepsilon_{12}\varepsilon_{13}\varepsilon_{23}$ .

Матрицы-проекторы определяются выражениями

$$P_1 = \frac{-\lambda_2 \varepsilon_N + \lambda_2 \lambda_3 I + \varepsilon_N^2 - \lambda_3 \varepsilon_N}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_1 - \lambda_2)},$$

$$P_2 = \frac{-\lambda_1 \varepsilon_N + \lambda_1 \lambda_3 I + \varepsilon_N^2 - \lambda_3 \varepsilon_N}{(\lambda_1 - \lambda_2)(-\lambda_3 + \lambda_2)},$$

$$P_3 = \frac{-\lambda_1 \varepsilon_N + \lambda_2 \lambda_1 I + \varepsilon_N^2 - \lambda_2 \varepsilon_N}{\lambda_3^2 - \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 - \lambda_2 \lambda_3}.$$

Используемые в параметризации (1), (2) параметры имеют определенный физический смысл. Величины  $\varepsilon_{ij}$  – это параметры смешивания, которые тождественно равны нулю в случае отсутствия связи между каналами  $i$  и  $j$ . Величина  $\delta_i$  – это сдвиг фазы в  $i$ -м канале. В тоже время явная связь между элементами S-матрицы и этими параметрами имеет весьма громоздкий вид в случае более чем двух связанных каналов. Записать в этом случае элементы S-матрицы в виде аппроксимаций Паде, явно сохраняя унитарность матрицы, также не представляется возможным.

В литературе предложена общая параметризация унитарных симметричных матриц [5]. Эта параметризация после простых преобразований позволяет выразить элементы S-матрицы через синусы и косинусы вещественных параметров. В частности, в случае матрицы  $3 \times 3$  имеем

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{pmatrix},$$

откуда получаем

$$S_{11} = \cos \psi_1 e^{i\varphi_1};$$

$$S_{22} = -\cos \psi_1 \cos \psi_2^2 e^{i(2\varphi_2 - \varphi_1)} + \sin \psi_2^2 e^{i\varphi_3};$$

$$S_{33} = -\sin \psi_2^2 \cos \psi_1 e^{i(2\varphi_3 - \varphi_1)} + \cos \psi_2^2 e^{i(2\varphi_3 - 2\varphi_2 + \varphi_4)};$$

$$S_{12} = \cos \psi_2 \sin \psi_1 e^{i\varphi_2};$$

$$S_{13} = \sin \psi_2 \sin \psi_1 e^{i\varphi_3};$$

$$S_{23} = -\cos\psi_2 \sin\psi_2 \cos\psi_1 e^{i(\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4)} - \sin\psi_2 \cos\psi_2 e^{i(\varphi_3 + \varphi_4 - \varphi_2)}.$$

Теперь можно аппроксимировать элементы S-матрицы рациональными дробями, используя следующие подстановки для элементарных функций:

$$e^{i\varphi_i} = \frac{f_2^{(i)}(q) + i f_1^{(i)}(q)}{f_2^{(i)}(q) - i f_1^{(i)}(q)}, \quad \cos\psi_i = \frac{(f_2^{(i)}(q))^2 - (f_1^{(i)}(q))^2}{(f_2^{(i)}(q))^2 + (f_1^{(i)}(q))^2}, \quad \sin\psi_i = \frac{2f_2^{(i)}(q)f_1^{(i)}(q)}{(f_2^{(i)}(q))^2 + (f_1^{(i)}(q))^2}, \quad (3)$$

где  $f_1(q), f_2(q)$  – нечетный и четный полиномы  $q$ , которые не обращаются в ноль одновременно. Эти подстановки сохраняют унитарность S-матрицы в явной форме независимо от выбора коэффициентов полиномов, что позволяет использовать полученную аппроксимацию Паде S-матрицы при решении уравнения Марченко. Коэффициенты полиномов определяются из фазового анализа экспериментальных данных рассеяния [6].

Связь между параметрами двух параметризаций имеет неявную форму. Тем не менее оба набора параметров, очевидно, выражаются друг через друга. Эти выражения могут быть найдены подходящими численными методами.

В случае трех связанных каналов рассеяния радиальное уравнение Шредингера имеет вид

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} + \begin{pmatrix} \frac{l_1(l_1+1)}{r^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_2(l_2+1)}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_3(l_3+1)}{r^2} \end{pmatrix} + V(r) \right) \begin{pmatrix} \chi_1(r) \\ \chi_2(r) \\ \chi_3(r) \end{pmatrix} = q^2 \begin{pmatrix} \chi_1(r) \\ \chi_2(r) \\ \chi_3(r) \end{pmatrix}.$$

Потенциал в этом случае – матрица

$$V(r) = \begin{pmatrix} V_1 & V_{12} & V_{13} \\ V_{12} & V_2 & V_{23} \\ V_{13} & V_{23} & V_3 \end{pmatrix},$$

в которой  $V_i(r)$  – потенциал в  $i$ -м канале;  $V_{ij}(r)$  – потенциал, связывающий  $i$  и  $j$  каналы.

Уравнение Марченко для любого числа связанных каналов записывается в виде

$$F(x, y) + L(x, y) + \int_x^{+\infty} L(x, y) F(x, y) dt = 0, \quad (4)$$

где в нашем случае  $L$  и  $F$  – матрицы размерности 3 на 3. Исходные данные для решения обратной задачи – это

$$\{S(q), (0 < q < +\infty), \tilde{q}_j, M_j, j = 1, \dots, n_b\},$$

где  $S(q)$  – матрица рассеяния, зависящая от относительного импульса  $q$ ;  $\tilde{q}_j^2 = 2mE_j \leq 0$ ,  $E_j$  – энергия  $j$ -го связанного состояния, так что  $i\tilde{q}_j \geq 0$ . Матрица  $M_j$  дает асимптотическое поведение  $j$ -го нормированного связанного состояния.

Ядро  $F(x, y)$  определено выражением

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(qx)(I - S(q))H(qy)dq + \sum_{j=1}^{n_b} H(\beta_j x)M_j H(\beta_j y), \quad (5)$$

где  $I$  – единичная матрица,

$$H(x) = \begin{pmatrix} h_{i_1}^+(x) & 0 & 0 \\ 0 & h_{i_2}^+(x) & 0 \\ 0 & 0 & h_{i_3}^+(x) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$h_i^+(x)$  – функция Ханкеля. Выражение для ядра  $F(x, y)$  получаем, подставляя аппроксимацию S-матрицы в выражение (5) и применяя теорему о вычетах:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n H(\beta_i x) Q_i^1 H(\beta_i y) + \sum_{i=1}^{n_{pos}^{(2)}} x H'(\beta_i x) Q_i^2 H(\beta_i y) + \sum_{i=1}^{n_{pos}^{(2)}} H(\beta_i x) Q_i^2 H'(\beta_i y) y,$$

где  $\beta_i (i = 1, \dots, n_{pos})$  – полюса S-матрицы с  $Im[\beta_i] > 0$ ;  $\beta_i (i = 1, \dots, n_{pos}^{(2)})$  – полюса второго порядка;  $\beta = \{\beta_1, \beta_{n_{pos}^{(2)}}, \tilde{q}_1, \tilde{q}_{nb}\}$ ;  $n = n_{pos} + n_b$ ,  $H'$  определяется выражением (6):

$$H'(x) = \begin{pmatrix} dh_{i_1}^+(x)/dx & 0 & 0 \\ 0 & dh_{i_2}^+(x)/dx & 0 \\ 0 & 0 & dh_{i_3}^+(x)/dx \end{pmatrix}.$$

Как нами было показано ранее [6], интегральное уравнение (4) решается подстановкой

$$L(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i(x) H(\beta_i y) + \sum_{i=1}^n N_i(x) y H'(\beta_i y),$$

где  $P_i(x), N_i(x)$  – неизвестные функциональные матрицы-коэффициенты, которые можно найти из условия линейной независимости матриц  $H(\beta_i y)$  и  $y H'(\beta_i y)$ . Определение  $P_i(x), N_i(x)$  сводится к решению системы линейных уравнений.

Потенциал  $V(r)$  определяется выражением

$$V(r) = -2 \frac{dL(x, y)}{dr}.$$

Описанный метод мы применили для модельной реконструкции потенциала. В качестве исходных данных были использованы результаты решения прямой задачи рассеяния. Результаты расчета представлены на рис. 1, где показаны результаты расчета для 1-го канала. Результаты для других каналов и недиагональных элементов потенциала имеют аналогичный вид.

Таким образом, разработанный нами ранее аналитический метод решения обратной задачи квантовой теории рассеяния в случае двух связанных парциальных волн [6] действительно может быть обобщен на случай произвольного числа связанных каналов, для чего может быть использована параметризация S-матрицы в виде, предложенном в литературе [2].

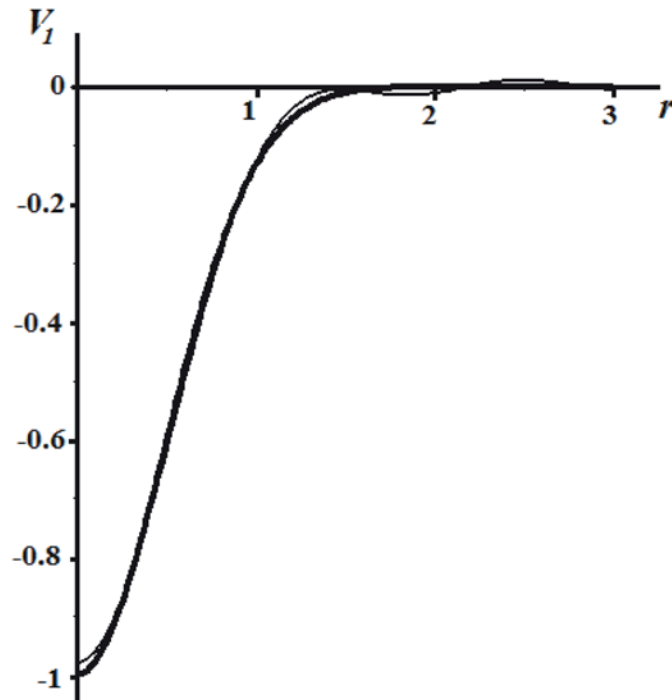


Рис. 1. Исходный и восстановленный потенциалы в канале 1:  
толстая линия – исходный потенциал (гауссоида);  
тонкая линия – результат решения обратной задачи

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бейкер, Дж. мл. Аппроксимации Паде / Бейкер Дж.мл. – М.: Мир, 1986. – 504 с.
2. Визнер, Я. Итерационные методы решения обратной задачи рассеяния / Я. Визнер, Е. П. Жидков, В. Лелек [и др.] // ЭЧАЯ. – 1978. – Т. 9. – № 3. – 710 с.
3. Марченко, В. А. Операторы Штурма-Лиувилля и их приложения / В. А. Марченко. – Киев: Наукова думка, 1977.
4. Dicker, H. General microwave circuit theorems, Principles of microwave circuits, C. G. Montgomery, R. H. Dicke and E. M. Purcell, eds., McGraw-Hill, New York, 1948.
5. Diță P., Parametrisation of unitary matrices, J. Phys. A: Math. Gen. 15 (1982) 3465-3473.
6. Khokhlov N. A. and Knyr V. A. Reconstruction of the optical potential from scattering data // Phys. Rev., 2006. – 73 p. 024004.

**Амосов О. С., Магола Д. С., Муллер Н. В.**  
**O. S. Amosov, D. S. Magola, N. V. Muller**

**ФРАКТАЛЬНЫЙ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ РЯДОВ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

**FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS OF TELECOMMUNICATION INFORMATION  
SYSTEM SERIES**

**Амосов Олег Семенович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [osa18@yandex.ru](mailto:osa18@yandex.ru).

**Mr. Oleg S. Amosov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Industrial Electronics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [osa18@yandex.ru](mailto:osa18@yandex.ru).

**Магола Дмитрий Степанович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [dmagola@list.ru](mailto:dmagola@list.ru).

**Mr. Dmitry S. Magola** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Informational Systems Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [dmagola@list.ru](mailto:dmagola@list.ru).

**Муллер Нина Васильевна** – старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [only\\_nina@mail.ru](mailto:only_nina@mail.ru).

**Ms. Nina V. Muller** – Senior lecturer, Health and Safety Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [on-ly\\_nina@mail.ru](mailto:on-ly_nina@mail.ru).

**Аннотация.** В условиях современного информационного общества любая сфера деятельности немаловажна без использования информационных систем (ИС), представляющих собой системы для хранения, поиска и обработки информации и включающие в себя ресурсы, обеспечивающие данную обработку. При этом независимо от масштабов системы обработка информации в том числе подразумевает и передачу информации по различным каналам связи с использованием сетевых телекоммуникационных технологий. Предложен модифицированный показатель самоподобности для телекоммуникационных рядов, произведена идентификация самоподобности сетевого трафика на основе R/S-метода и вейвлет-анализа.

**Summary.** In the modern information society any sphere of activity cannot be imagined without the use of information systems. They are the systems for storage, retrieval and processing information. They also include resources supporting this processing. Moreover, irrespective of their scale the systems processing information comprise transmitting information by different channels with the use of network telecommunication technologies. The authors of the article offer the modified index of self-similarity for telecommunication series, and fulfill the identification of self-similarity of network traffic based on the R/S-method and the wavelet analysis.

**Ключевые слова:** телекоммуникационный ряд, информационная система, самоподобность, идентификация, фрактальный и вейвлет-анализ.

**Keywords:** telecommunication series, information system, self-similarity, identification, fractal and wavelet analysis.

УДК 519.711.3

**Введение**

*Актуальность.* Разработка и исследование математических моделей сетевого телекоммуникационного трафика позволяют определить границы сетевой производительности и оптимизировать сетевую структуру системы, минимизировав задержки в очереди. Традиционные модели сетевого трафика проявляют пульсирующий характер на коротких отрезках времени, но сильно сглажены на больших отрезках, однако трафик проявляет изменчивость в широком диапазоне масштабов времени. При рассмотрении сетевого телекоммуникационного трафика одной из важных задач является выявление аномалий и своевременное реагирование на них. Например, другой задачей можно назвать построение полностью децентрализованной компьютерной сети, т.е. сети, не требующей центрального регулирования раздачи адресов хостов и при этом максимально устойчивой к работе. Анализ сетевого телекоммуникационного трафика сводится к анализу временных рядов (ВР), для которого наиболее широко используются традиционные методы статистического анализа случайных величин и функций. Наряду с ними в последние годы получают распространение способы обработки сигналов, основанные на фрактальном и вейвлет-преобразованиях [1; 4; 9; 13]. Особенностью первых является выявление самоподобности, что позволяет отнести временной ряд к заранее определенной модели, а отличительная особенность последних состоит в том, что они позволяют вскрыть особенности локальной структуры и выявить различные свойства сложного сигнала, невидимые при обычном представлении в режиме реального времени.

Следовательно, существует необходимость в разработке новых и модификации существующих алгоритмов анализа телекоммуникационных рядов ИС.

*Целью работы* является анализ телекоммуникационного ряда в части идентификации модели временного ряда на основе фрактального и вейвлет-анализа.

**Постановка задачи**

Имеются выходные значения временного ряда телекоммуникационного трафика ИС  $y(t)$ . Требуется выяснить структуру ряда, определив его математическую модель  $y_M(t)$ , оптимизировать параметры модели путем вычисления ошибки  $\varepsilon(t) = y(t) - y_M(t)$  и определить соответствия выходных и моделируемых значений ВР с использованием некоторого критерия.

В большинстве практических случаев задача решается из условия минимума средней квадратической ошибки [8]:

$$M \{ \rho[y(t), y_M(t)] \} = M \{ \varepsilon^2(t) \} \rightarrow \min ,$$

где  $\varepsilon(t) = y(t) - y_M(t)$  – ошибка идентификации;  $\rho[y(t), y_M(t)] = \varepsilon^2(t)$  – функция потерь;  $M$  – знак математического ожидания.

**Фрактальный анализ**

Фракталами в математическом смысле называют множества, обладающие свойствами самоподобности, т.е. единообразия структуры в широком диапазоне масштабов [11; 12]. В широком смысле фрактал может и не быть самоподобным, но в данной работе такие фракталы не рассматриваются. К числу других основных понятий фрактальных процессов относят долговременную зависимость, медленно затухающую дисперсию, бесконечные моменты, фрактальные размерности.

Во фрактальном анализе показатели хаотичности – это показатели самоподобности (показатель Херста)  $H$  и фрактальной размерности  $D$ , которые отражают степень хаотичности временного ряда, где  $D = 2 - H$ .

Значение  $H$  позволяет искать решение в одном из четырех классов:

- 1) детерминированный временной ряд, аппроксимирующийся линейной или нелинейной монотонной функцией при  $H \approx 1$ ;
- 2) персистентный ряд, аппроксимирующийся авторегрессионными моделями при  $0,5 < H < 1$ ;
- 3) антиперсистентный ряд, аппроксимирующийся качественными моделями при  $0 < H < 0,5$ ;
- 4) стохастический временной ряд, аппроксимирующийся марковскими моделями при  $H \approx 0,5$ .

В случаях 2 и 3 для моделирования временного ряда может быть использована модель фрактального броуновского движения (ФБД) [7].

Случайный процесс  $X(t)$  называется ФБД с параметром  $H$  (показатель Херста),  $0 < H < 1$ , если приращения случайного процесса  $\Delta X(\tau) = X(t+\tau) - X(t)$  имеют гауссовское распределение вида [7]

$$P(\Delta X < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma\tau^H}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma^2\tau^{2H}}\right] dz,$$

где  $\sigma$  – стандартное (среднеквадратичное) отклонение случайной величины  $X$ .

ФБД с параметром  $H = 0,5$  совпадает с классическим броуновским движением.

### Математическая модель временного ряда

В литературе предложена универсальная модель временного ряда с учетом возможных диапазонов изменения показателей хаотичности [2]:

$$y_t = \eta_t + \chi_t + \varepsilon_t,$$

где  $\eta_t$  – трендовая составляющая;  $\chi_t$  – компонента, выражающая меру хаотичности ряда, описывающая характер процесса и зависящая от  $H$  (показателя Херста) или  $D$  (показателя фрактальной размерности);  $\varepsilon_t$  – случайный шум.

Для построения трендовой составляющей  $\eta_t$  чаще всего применяются следующие функции [7]:

- 1) для линейного тренда  $\eta = ax + b$ ;
- 2) для логарифмического тренда  $\eta = (a \lg(x)) + b$ ;
- 3) для степенного тренда  $\eta = ax^b$ ;
- 4) для экспоненциального тренда  $\eta = ae^{bx}$ .

Полином степени  $n$  равен  $\eta = (a_n x^n) + \dots + (a_2 x^2) + (a_1 x^1) + b$ ;  $t = t_0, t_1, \dots, t_n$  – моменты времени.

Оценка  $H$  зависит от многих факторов и ее определение само по себе является сложной задачей, поскольку при работе в реальных условиях исследователь всегда ограничен конечными наборами данных, что приводит к невозможности однозначного утверждения о наличии или отсутствии самоподобности всей трассы ряда.

Наиболее часто на сегодняшний день для оценки показателя Херста используется анализ нормированного размаха (R/S-метод), анализ графика изменения дисперсии [11; 12] и вейвлет-анализ [9; 13].

Нормированная безразмерная мера, способная описывать изменчивость временного ряда, названа нормированным размахом (R/S). Для заданного набора наблюдений  $X$  со средним значением

$$\bar{X} = \left( \sum_{j=1}^n X_j \right) / n,$$

где  $n$  – количество наблюдений, вводится понятие размаха (разности между максимальным и минимальным отклонением)

$$R(n) = \max \Delta_j - \min \Delta_j,$$

где  $1 \leq j \leq n$ ,  $\Delta_k = \sum_{i=1}^k (X_i - k\bar{X})$ ,  $\forall k = \overline{1, n}$ , а  $S(n) = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n}$ . Известно, что для многих

природных явлений математическое ожидание нормированного размаха примерно равно  $cn^H$  при  $n \rightarrow \infty$ , где  $c$  – положительная константа, не зависящая от  $n$ .

Следовательно, показатель  $H$  можно получить, изобразив график зависимости  $\log(M(R(n)/S(n)))$  от  $\log(n)$ , и, используя полученные точки, подобрать по методу наименьших квадратов прямую линию с наклоном  $H$ .

С целью определения количественного значения  $H$  Херст привел эмпирический закон в виде [7]

$$H = \text{Ln} \left( \frac{R}{S} \right) / \text{Ln} \left( \frac{n}{2} \right).$$

### Вейвлет-анализ

Вейвлет-анализ необходим, чтобы идентифицировать временной ряд при наличии у него локальных особенностей и неоднородностей.

*Непрерывное вейвлет-преобразование.* Прямое и обратное непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $s(t)$  имеют вид [13]

$$W_s(a, b) = (s(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt,$$

$$s(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{dadb}{a^2},$$

где  $\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  – вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом  $\psi(t)$  за счет операций сдвига во времени ( $b$ ) и изменения временного масштаба ( $a$ );  $C_\psi$  – нормирующий коэффициент;  $(\cdot, \cdot)$  – скалярное произведение соответствующих сомножителей.

*Дискретное вейвлет-преобразование.* Вейвлет-разложение аппроксимации  $j$ -го уровня разрешения  $\tilde{s}(t)$  для глубины разложения  $m$  имеет вид [9]

$$\tilde{s}_j(t_i) = \tilde{s}_{j-m}(t_i) + \tilde{s}_{j-m}^d(t_i) + \dots + \tilde{s}_{j-1}^d(t_i),$$

$$\tilde{s}_j(t_i) = \sum_{k \in Z} a_{j-m,k} \varphi_{j-m,k}(t_i) + \sum_{k \in Z} d_{j-m,k} \psi_{j-m,k}(t_i) + \dots + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(t_i),$$

где  $j$  характеризует уровень разрешения;  $\varphi_{j-m,k}(t_i)$ ,  $\psi_{j-m,k}(t_i)$  – соответственно масштабирующая (аппроксимирующая) и вейвлет-функция (детализирующая функция);  $\mathbf{a}_{j-m,k} = \{a_{j-m,k}\}$ ,  $\mathbf{d}_{j-\gamma,k} = \{d_{j-m,k}\}$ ,  $\gamma = \overline{1,m}$  – наборы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов разложения ( $j-\gamma$ ) уровня разрешения;  $Z = \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$  – множество целых чисел.

На практике показатель Херста оценивается с помощью дискретного вейвлет-преобразования. Для этого в режиме реального времени вычисляются детализирующие коэффициенты  $\mathbf{d}_{j,k}$  для каждого уровня разложения  $j$ ,  $j = \overline{1,m}$  и каждой позиции  $k$ ,  $k = \overline{1,n_j}$ , где  $n_j$  – число вейвлет-коэффициентов на уровне разложения  $j$ . Далее выполняется оценка

дисперсии для каждого уровня  $j$ :  $\varepsilon_j = (1/n_j) \cdot \sum_{k=1}^{n_j} d^2(j,k)$ , строится зависимость  $\log_2(\varepsilon_j)$  от

уровня  $j$ , вычисляется наклон  $\alpha$  линии регрессии и вычисляется  $H = \frac{\alpha+1}{2}$  [11; 12].

### Анализ телекоммуникационного трафика

Для того чтобы проанализировать телекоммуникационный трафик, предлагается использовать алгоритм, состоящий из следующих этапов:

- 1) Предобработка временного ряда трафика, которая заключается в выборке статистических данных для формирования интересующего нас временного ряда.
- 2) Оценка показателя самоподобности с использованием различных методов, например R/S-метода и вейвлет-анализа.
- 3) Идентификация математической модели ВР путем аппроксимации с известными моделями или синтез структуры и параметров математической модели ВР.

Для снижения вероятности неверного истолкования результатов оценки  $H$  предлагается анализировать не только всю выборку, но и проводить анализ отдельных блоков данной выборки. При этом следует рассматривать блоки отдельно, со смещением окна и/или нарастающим образом. В зависимости от метода оценки  $H$  далее необходимо производить расчеты для каждого рассматриваемого блока(-ов) отдельно и найти математическое ожидание найденных результатов. Данный модифицированный показатель Херста, по мнению авторов, будет более адекватно отражать реальную ситуацию по идентификации телекоммуникационного временного ряда на самоподобность.

Результатом решения будет полноценная объемная информация о временном телекоммуникационном ряде ИС с выявленными характеристиками, по которым можно идентифицировать математическую модель ВР. Для решения какой-либо практической задачи, например выявления аномалий в сетевой трафике для решения задачи обеспечения целостности данных в ИС, ВР на управляемом промежутке времени необходимо сравнить с идентифицированной моделью и на основе результата произвести оценку.

### Иллюстрирующий пример

*Первый этап.* Рассматриваем два временных ряда входящего и исходящего интернет-трафика в организации со средним объемом более 160 Gb в день: выборка за 60 сут с шагом дискретизации 1 ч и выборка за 7 сут с шагом дискретизации 1 мин.

*Второй этап.* Производим модифицированную оценку показателя самоподобности на основе R/S-метода и вейвлет-анализа (рис. 1, 2). Результаты оценки самоподобности для обоих временных рядов сетевого трафика интенсивности в байтах представлены в табл. 1, 2.

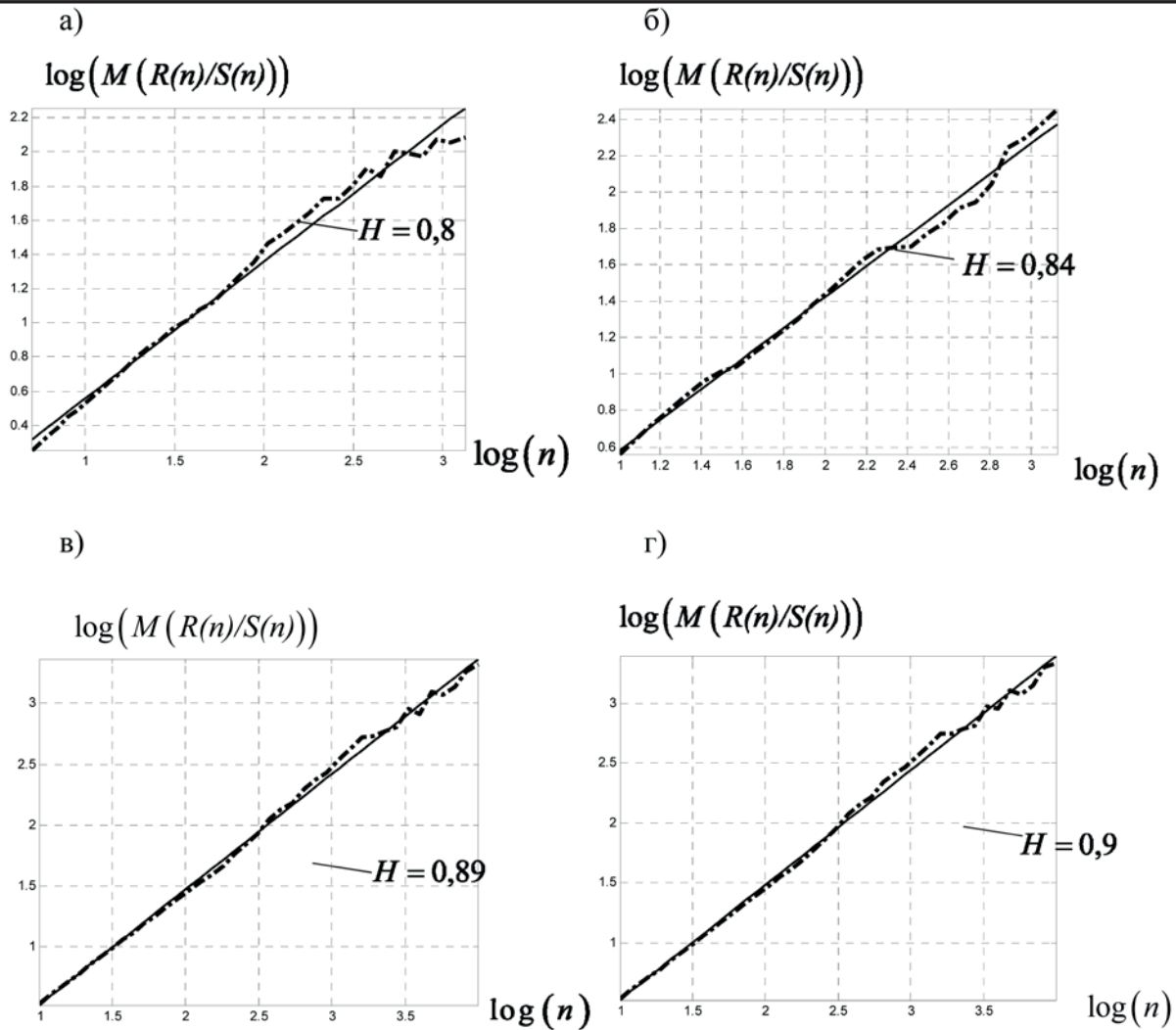


Рис. 1. R/S-метод оценки самоподобности:

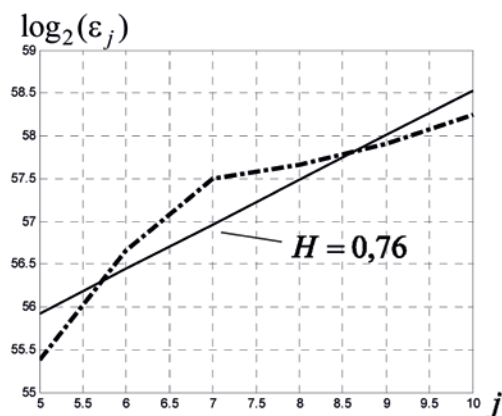
- а – анализ двухмесячного ряда (шаг = 1 ч) интенсивности в байтах;
- б – анализ двухмесячного ряда (шаг = 1 ч) интенсивности в пакетах;
- в – анализ недельного ряда (шаг = 1 мин) интенсивности в байтах;
- г – анализ недельного ряда (шаг = 1 мин) интенсивности в пакетах

Таблица 1

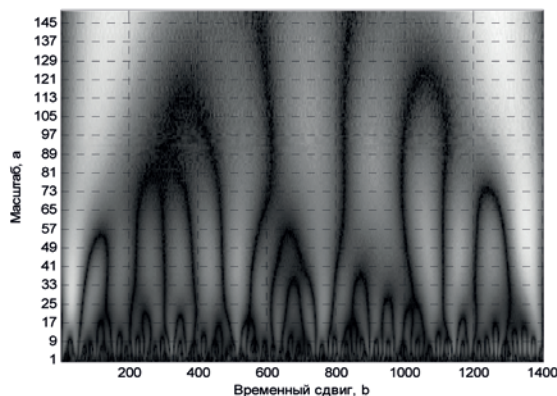
Значения показателя  $H$  для двухмесячного ряда

Номер блока	Размер блока (количество дискретных точек)	Значение показателя Херста	
		R/S-метод	Вейвлет-анализ
1	100	0,9381	0,7670
2	200	0,9179	0,7888
3	300	0,8861	0,6000
4	500	0,8445	0,7289
5	800	0,7949	0,7124
6	1000	0,8055	0,7231
7	1200	0,7913	0,7036
8	1400	0,7966	0,7613

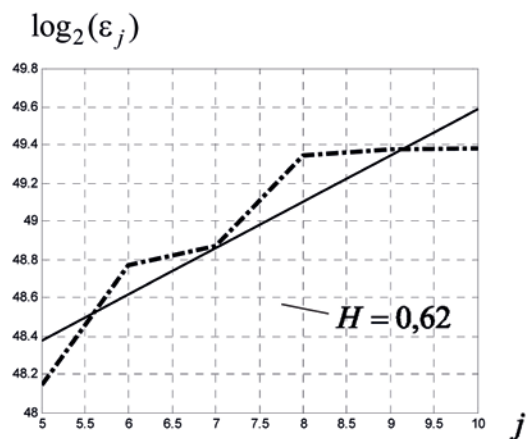
а)



б)



в)



г)

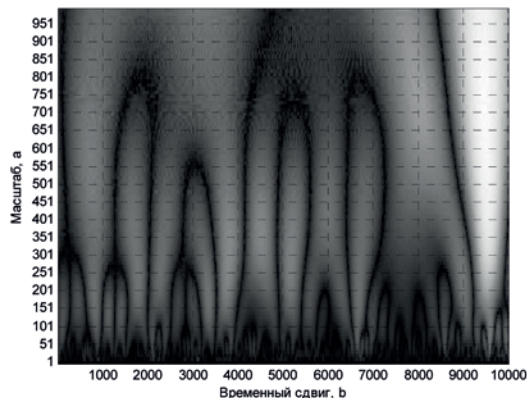


Рис. 2. Вейвлет-анализ оценки самоподобности:

- а – анализ двухмесячного ряда (шаг = 1 ч) интенсивности в байтах;
- б – вейвлет-спектр двухмесячного временного ряда интенсивности в байтах;
- в – анализ недельного ряда (шаг = 1 мин) интенсивности в байтах;
- г – вейвлет-спектр недельного временного ряда интенсивности в байтах

Таблица 2

Значения показателя  $H$  для недельного ряда

Номер блока	Размер блока (количество дискретных точек)	Значение показателя Херста	
		R/S-метод	Вейвлет-анализ
1	100	0,8943	0,8075
2	200	0,7897	0,8435
3	300	0,8574	0,8279
4	500	0,8453	0,6560
5	1000	0,8696	0,6545
6	5000	0,8719	0,5434
7	8000	0,8623	0,5853
8	10000	0,8899	0,6211

На рис. 1 показаны зависимости логарифмов нормированного размаха от логарифмов длин диапазонов и линейная регрессия с наклоном  $H$  в соответствии с R/S-методом. Рассматриваемые временные ряды делились нарастающим образом на блоки с шагом в 100 дискретных точек, т.е. первый блок включал 100 значений, второй – 200, третий – 300 и т.д. В свою очередь, каждый блок делился на интервалы размером от 10 дискретных точек до длины блока с увеличением размера между соседними интервалами на 20 %. Для каждого интервала вычислялось отношение R/S и математическое ожидание R/S рассматриваемого блока.

На рис. 2 показаны зависимости логарифмов оценки дисперсии детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения  $\log_2(\varepsilon_j)$  от соответствующего уровня разложения  $j$ . Рассматриваемые временные ряды делились нарастающим образом на блоки с шагом в 100 дискретных точек, т.е. первый блок включал 100 значений, второй – 200, третий – 300 и т.д. Каждый блок подвергался вейвлет-разложению с использованием вейвлета Добеши. Значения уровня вейвлет-разложения находилось в диапазоне [8; 6].

Оба используемых метода, а также вейвлет-спектр показали, что в рассматриваемых временных рядах значения показателя самоподобности находятся в диапазоне  $0,5 < H < 1$ , следовательно, ряд является персистентным и может быть аппроксимирован авторегрессионными моделями.

Наличие информации о самоподобности позволяет осуществлять меры по управлению трафиком, в частности для решения задач информационной безопасности в части обеспечения целостности передаваемой информации. При оцененном значении показателя самоподобности и появлении аномальной активности показатель Херста будет изменяться в большую или в меньшую сторону в зависимости от наличия самоподобности в самой аномалии, что может служить сигналом для принятия соответствующих мер. Например, компьютерные сетевые и вирусные атаки по своей природе являются самоподобными, поэтому их появление будет увеличивать значение самоподобности в рассматриваемый промежуток времени.

### **Выводы**

Дана постановка задачи и предложено модифицированное решение на основе вейвлет-фрактального подхода.

Рассмотрены практические примеры идентификации временных рядов сетевого трафика на основе критерия самоподобности.

В дальнейшем планируется проиллюстрировать оценку влияния аномальной активности на самоподобность временного ряда.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ. Основы теории и примеры применения / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук, 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145-1170.
2. Амосов, О. С. Структурно-параметрическая идентификация временного ряда с применением фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Н. В. Муллер, Ф. Ф. Пашенко // Информатика и системы управления. – 2015. – № 2(44) – С. 80-88.
3. Амосов, О. С. Оценивание случайных последовательностей с использованием регрессии и вейвлетов / О. С. Амосов, Л. Н. Амосова, Д. С. Магола // Информатика и системы управления. – 2009. – № 3(21). – С. 101-109.
4. Амосов, О. С. Исследование временных рядов с применением фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Н. В. Муллер // Интернет-журнал «Наукоедение». – 2014. – № 3(22). – С. 1-14. – Режим доступа: <http://publ.naukovedenie.ru>.
5. Эконометрика: учеб. / под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 344 с.
6. Колесов, Н. В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование / Н. В. Колесов, М. В. Толмачева, П. В. Юхта. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2014. – 180 с.



7. Короленко, П. В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования: учеб. пособие / П. В. Короленко, М. С. Маганова, А. В. Меснянкин. – М.: МГУ им. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, 2004. – 82 с.
8. Пашенко, Ф. Ф. Основы моделирования энергетических объектов / Ф. Ф. Пашенко, Г. А. Пикина. – М.: Физматлит, 2011. – 556 с.
9. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
10. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
11. Шелухин, О. И. Моделирование информационных систем / О. И. Шелухин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012. – 536 с.
12. Шелухин, О. И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О. И. Шелухин, А. В. Осин, С. М. Смольский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
13. Яковлев, А. Н. Введение в вейвлет-преобразование: учеб. пособие / А. Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

**Еренков О. Ю.**  
**O. Yu. Erenkov**

**КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**THE COMBINED METHOD OF POLYMERIC MATERIAL TURNING**

**Еренков Олег Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), профессор кафедры «Химическая технология и биотехнология» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: [erenkov@list.ru](mailto:erenkov@list.ru).

**Mr. Erenkov Yu. Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), Professor of Chemical Technology Department at the Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: [erenkov@list.ru](mailto:erenkov@list.ru).

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований нового метода токарной обработки заготовок из полимерных материалов. Сущность метода заключается в предварительном механическом, тепловом или комбинированном воздействии на заготовки из полимерного материала и последующем точении. Анализ полученных результатов подтверждает целесообразность применения предложенного метода, т.к. имеет место снижение шероховатости и значений отклонений формы обработанной поверхности деталей.

**Summary.** The results of experimental investigations of a new method of turning work pieces made from polymeric materials are presented. The method consists in preliminary mechanical, thermal, or combined impact on the polymeric work piece and its subsequent turning. The analysis of the results confirms the feasibility of applying the proposed method, since there is a reduction in roughness and values of the deviations of the work piece shape.

**Ключевые слова:** полимерные материалы, тепловые флуктуации, механическое деформирование, структура, точение, обработанная поверхность, параметры шероховатости, отклонения формы.

**Key words:** polymeric materials, thermal fluctuations, mechanical deformation, structure, turning, machined surface, roughness parameters, form deviations.

УДК 621.921.8(043)

**Введение**

Работоспособность деталей машин и механизмов в значительной степени определяется свойствами обработанной поверхности. Такие свойства, как правило, формируются на конечной стадии технологического процесса изготовления деталей. В технологическом процессе изготовления деталей из полимерных материалов в большинстве случаев на конечной стадии проводят механическую обработку резанием. Качество обработанной поверхности в значительной степени определяется ее геометрическими характеристиками и является доминирующим фактором в формировании многих эксплуатационных свойств детали, сочетание которых и определяет уровень работоспособности детали.

К основным геометрическим характеристикам качества обработанной поверхности деталей относятся шероховатость и точность формы поверхности. Токарная обработка полимерных материалов на основе традиционных технологических решений далеко не во всех случаях обеспечивает требуемый уровень геометрических характеристик обработанной по-

верхности, т.к. свойства полимерных материалов значительно отличаются от свойств традиционных конструкционных материалов, таких как сталь, чугун и сплавы.

Таким образом, задача повышения работоспособности деталей из полимерных материалов за счет улучшения качества обработанной поверхности является актуальной, а её решение возможно на основе разработки новых способов механической обработки.

Цель данной работы – экспериментальные исследования взаимосвязи между геометрическими характеристиками качества обработанной поверхности деталей из полимерных материалов и вариантом токарной обработки заготовок.

### **Способ обработки полимерных материалов**

Известно, что прочность полимерного материала главным образом зависит от приложенного напряжения и температуры [1]. При рассмотрении обработки режущим инструментом как разновидности процесса управляемого разрушения твердого полимерного материала и в соответствии с кинетической концепцией прочности разработан новый комбинированный способ обработки полимерных материалов [2].

Сущность способа заключается в том, что предварительно осуществляют комплексное термомеханическое воздействие на обрабатываемую заготовку, обеспечивающее изменение напряженно-деформированного материала, а затем осуществляют токарную обработку поверхности заготовки режущим инструментом, при этом предварительное механическое воздействие на материал осуществляется посредством растяжения или сжатия и предшествует тепловой обработке.

Путем регулировки величины прикладываемого напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$  теплового воздействия на материал обеспечивается возбуждение межатомных связей приложенным механическим усилием и разрыв части возбужденных связей в полимерных цепях тепловыми флуктуациями в соответствии с кинетической концепцией прочности. За счет наличия первичных дефектов в структуре материала и реализации дилатонного механизма образования микротрещин имеет место эффект технологического разупрочнения структуры материала [1], в которой часть связей разрушена, а часть – напряжена. Это приводит к уменьшению энергии активации связей полимера и при дальнейшем взаимодействии поверхностного слоя материала с режущим клином инструмента – к снижению силы резания, т.к. облегчается процесс деформирования срезаемого слоя за счет образования зоны предразрушения. Размеры зоны пластической деформации перед режущим клином и микротрещин в срезаемом припуске материала уменьшаются, магистральная трещина приобретает более устойчивое направление развития вдоль линии среза, что является предпосылкой снижения шероховатости обработанной поверхности, т.к. снижается вероятность образования взрывов, сколов и подобных дефектов обрабатываемого резанием материала.

Изменения в структуре материала после деформации сжатия подтверждаются данными рентгеноструктурного анализа, проведенного на установке ДРОН-7, установленной в Тихоокеанском государственном университете.

Как известно, из-за наличия в кристаллах различного рода дефектов (дислокаций, атомов внедрения, вакансий) при деформировании материала возникают статические напряжения [3]. Данные напряжения приводят к статическим искажениям, которые связаны с отклонением атомов из положений равновесия, определяемых узлами решетки. Эти искажения охватывают группы атомов и молекул, участвующих в создании нарушений структуры. Статические искажения, вызванные смещением атомов из их нормальных положений, имеют такой же эффект, как и смещение атомов при тепловых колебаниях (последние называют динамическими искажениями). Статические искажения не могут существовать в чистом виде, без динамических искажений, поэтому на интенсивность линий рентгенограммы влияют оба фактора. По уменьшению интенсивности можно оценить величину искажения.

Простейшим способом оценки искажений является измерение отношения интенсивностей линии и фона на рентгенограммах образцов с искаженной и неискаженной решетками. Уменьшение соотношения  $I_{hkl}/I_{фон}$  соответствует увеличению искажений решетки.

Как видно из рис.1, на примере испытания капролона интенсивность колебаний атомов относительно положения равновесия для случаев деформированного и недеформированного состояния образцов заметно отличается, что и свидетельствует об изменении напряженно-деформированного состояния полимерной цепи.

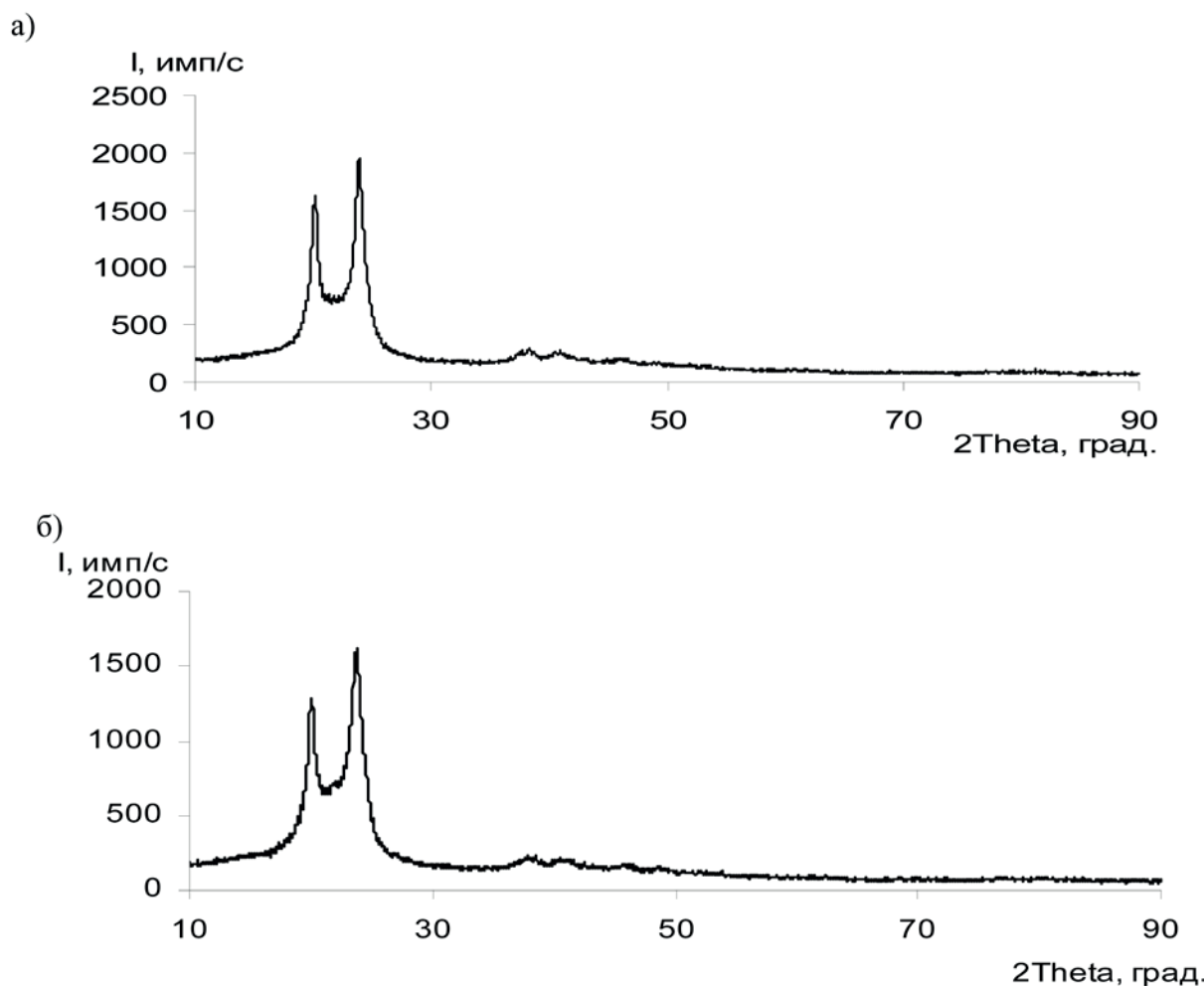


Рис. 1. Данные рентгеноструктурного анализа капролона:  
а – после сжатия; б – до сжатия

### Методика эксперимента

В качестве исследуемого материала выбран капролон В (ТУ 5.966-13411-93). Капролон обладает высокими прочностными и эксплуатационными свойствами, имеет низкий коэффициент трения, в 6 – 7 раз легче бронзы и стали. Материал не корродирует, химически стоек, экологически чист. Изделия из капролона обеспечивают надежную и бесшумную работу устройств и механизмов, как правило, в 1,5 – 2,0 раза снижают износ пар трения, повышая их ресурс. Указанные свойства обеспечивают широкое применение капролона В во многих отраслях промышленности для изготовления подшипниковых опор, зубчатых колес, шкивов, уплотнительных элементов насосов и др.

Тепловая обработка заготовок из капролона В проводилась согласно условию [4; 5]

$$T_{хр} < \Delta t_{экспл} < T_{стекль}$$

где  $T_{\text{хр}}$  – температура хрупкости материала;  $\Delta t_{\text{экспл}}$  – температурный диапазон эксплуатации изделий из исследуемого материала;  $T_{\text{стекл}}$  – температура стеклования.

Заготовки нагревались в масляной среде до температуры 60 °С.

При проведении экспериментальных исследований величина усилия на сжатие / растяжение выбиралась с помощью зависимости «деформация – напряжение» из области, соответствующей упругой деформации, до развития явления вынужденной эластичности. При этом прикладываемые к заготовке усилия должны создавать в объеме материала такое напряженное состояние, чтобы выполнялось следующее условие [5]:

$$\sigma_{\text{н}} = (0,6 - 0,8)\sigma_{\text{к}},$$

где  $\sigma_{\text{н}}$  – напряжения, создаваемые в заготовке усилием растяжения / сжатия;  $\sigma_{\text{к}}$  – предельная прочностная характеристика материала.

При выполнении данного условия разрушение твердых полимерных материалов имеет чисто термофлуктуационный механизм, описываемый кинетической концепцией прочности [1; 3], т.е. происходит разрыв химических связей под влиянием приложенного напряжения и тепловых флуктуаций.

Токарная обработка экспериментальных образцов проводилась на универсальном токарно-винторезном станке модели 16К20Ф3С47. Геометрические параметры и материал режущего инструмента, а также значения скорости резания и подачи были приняты на основе ранее проведенных исследований [6; 7] и поддерживались постоянными в течение данной серии экспериментов. Для предварительного деформирования цилиндрических заготовок из капролона использовалась испытательная машина WDW-50E (производство КНР). Качество обработанной поверхности оценивается по следующим показателям: параметры шероховатости, отклонения формы. Оценка отклонений формы обработанных поверхностей производилась с применением цифрового измерительного комплекса Rondcom 41С (производство Японии). В качестве контролируемых параметров отклонений формы получаемых поверхностей использовались:

- отклонение от цилиндричности;
- отклонение образующей от прямолинейности;
- отклонение от круглости.

Шероховатость поверхности контролировали при помощи профилометра TR200 (производство США). В качестве выходных параметров из номенклатуры параметров шероховатости согласно ГОСТ 2789-73 выбраны:

- среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ ;
- высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ ;
- наибольшая высота неровностей профиля  $R_{\text{max}}$ ;
- средний шаг неровностей профиля  $S_m$ .

Дополнительно определялись параметры шероховатости в соответствии с международным стандартом ISO 4288:

- расстояние от вершины наибольшего выступа профиля до средней линии  $P_p$ ;
- расстояние от дна наибольшей впадины профиля до средней линии  $P_m$ ;
- асимметрия профиля  $S_k$ .

Данные параметры имеют важное практическое значение для оценки качества поверхностного слоя. Согласно положениям ISO 4288, профиль с положительными значениями параметра  $S_k$  имеет четкие высокие пики, которые выделяются от среднего. Поверхности с отрицательными значениями  $S_k$  имеют четкие глубокие впадины в гладких плато профиля. В менее очевидных случаях значения  $S_k$  приближаются к нулю. Значения  $S_k > 1,5$  показывают, что поверхность имеет непростую форму и простые параметры ( $R_a$ ,  $R_z$ ), и, вероятно, не могут адекватно характеризовать качество поверхностного слоя.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

*Шероховатость обработанной поверхности.* На рис. 2 представлены результаты исследования уровня шероховатости поверхностного слоя детали из капролона *B* в виде профилограмм. Анализ данных профилограмм показывает, что вариант токарной обработки с применением предварительных сжатия и нагрева предпочтителен по сравнению с другими вариантами обработки. Численные значения исследуемых параметров шероховатости, сведенные в табл. 1, подтверждают этот факт, при этом значения параметра  $S_k$  подтверждают правомерность оценки шероховатости по известным параметрам  $R_a$  и  $R_z$ .

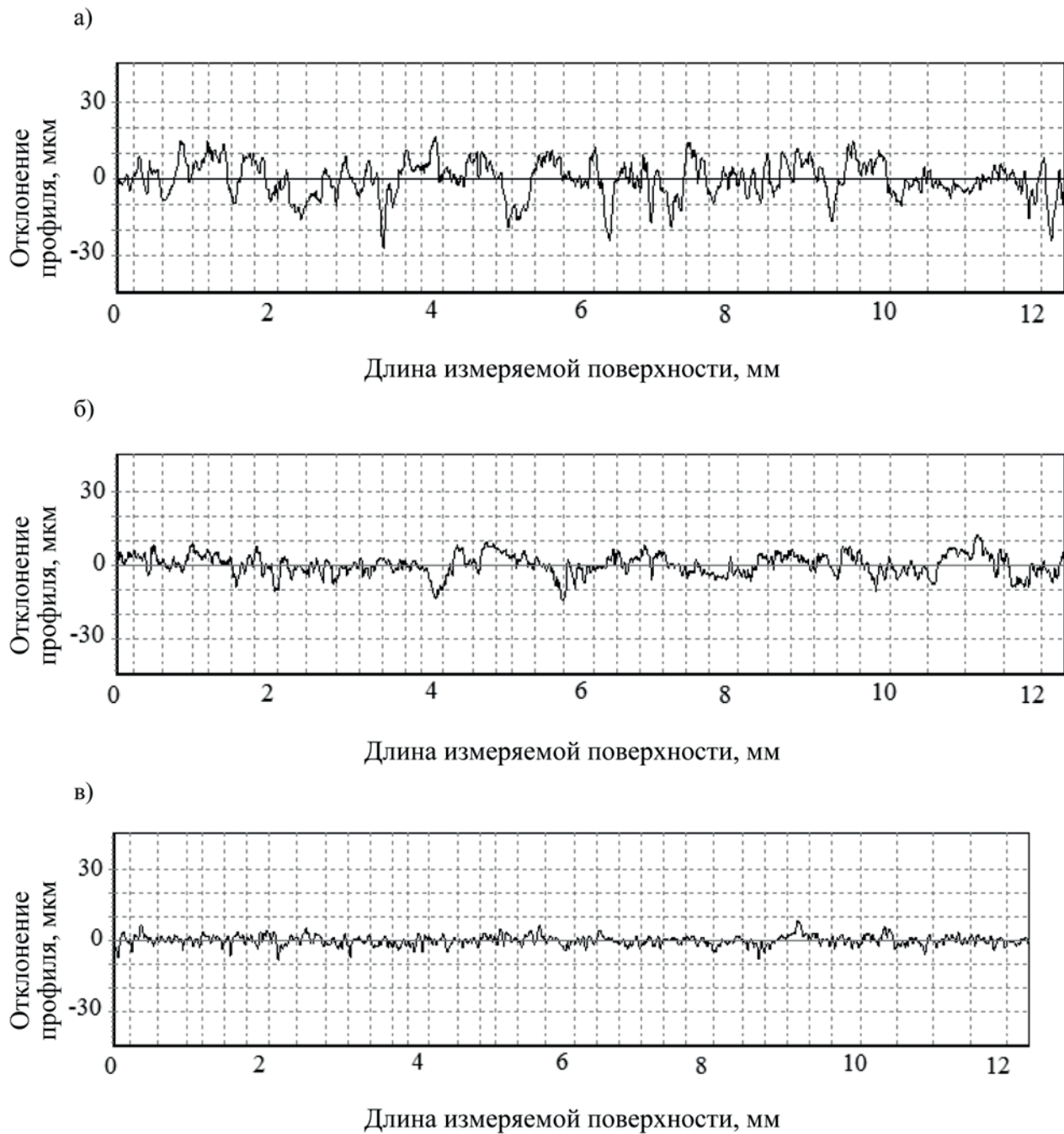


Рис. 2. Профилограммы поверхностей деталей из капролона: а – точение; б – предварительное растяжение и точение; в – предварительное сжатие и точение

Таблица 1

## Шероховатость обработанной поверхности деталей из капролона

Вариант обработки	Параметры шероховатости, мкм						
	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$R_p$	$R_m$	$S_m$	$S_k$
Предварительное растяжение, нагрев, точение	5,92	13,70	20,75	9,527	11,23	0,271	-0,57
Предварительное сжатие, нагрев, точение	4,393	5,68	9,016	5,320	3,696	1,388	-0,17
Обычное точение	7,6	22,72	35,97	14,02	21,95	0,337	0,27

Общую тенденцию снижения шероховатости обработанной точением поверхности после предварительного термомеханического воздействия можно объяснить следующим образом. После снятия механической нагрузки на заготовку в объеме материала действуют остаточные напряжения, приводящие к образованию поверхностных дефектов в виде микротрещин, в вершинах которых образуются зоны перенапряжения [1; 3]. В данных зонах, в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности твердых тел, имеет место частичное разрушение как химических, так и межмолекулярных связей полимера, а предварительный нагрев заготовок приводит к возникновению дополнительных тепловых флуктуаций атомов материала, которые способствуют снижению энергии активации процесса разрыва химических связей. В результате имеет место технологическое разупрочнение поверхностного слоя заготовки, что является основой снижения шероховатости обработанной точением поверхности заготовки в соответствии с технической сущностью разработанного способа.

*Отклонения формы.* С целью выявления целесообразности и возможности применения предварительного деформирования заготовок из фторопласта-4 проводилась оценка отклонений формы поверхностей деталей. В связи с особенностями структуры полимерных материалов и спецификой поведения при действии внешней нагрузки результаты такого исследования имеют значительную практическую ценность. Измеренные значения отклонений от цилиндричности, круглости и непрямолинейности образующей обработанной поверхности материалов после обычной токарной обработки, а также после обработки с применением предварительного термомеханического воздействия на заготовки представлены на рис. 3.

Анализ представленных данных показывает следующее. На основании полученных данных по нецилиндричности (см. рис. 3, а) предварительное термомеханическое воздействие на заготовки из капролона приводит к снижению отклонения от цилиндричности более чем в три раза. В случае токарной обработки заготовки из капролона максимальное отклонение от цилиндричности составляет 23 мкм; после точения с предварительным сжатием и нагревом заготовки данное отклонение не превышает 7 мкм; после точения с предварительным растяжением и нагревом заготовки данное отклонение составляет 11 мкм.

Значения непрямолинейности образующей деталей из капролона (см. рис. 3, б), полученные при исследуемых вариантах обработки, составляют 28 мкм при традиционном точении, 15 мкм после точения с предварительным растяжением и нагревом заготовки и 13 мкм после точения с применением предварительного сжатия и нагрева заготовки.

Значения некруглости деталей (см. рис. 3, в), полученные при исследуемых вариантах обработки, отличаются незначительно и составляют 21 мкм при традиционном точении, 19 мкм после точения с применением предварительного растяжения и нагрева заготовки и 17 мкм после точения с применением предварительного сжатия и нагрева заготовки.

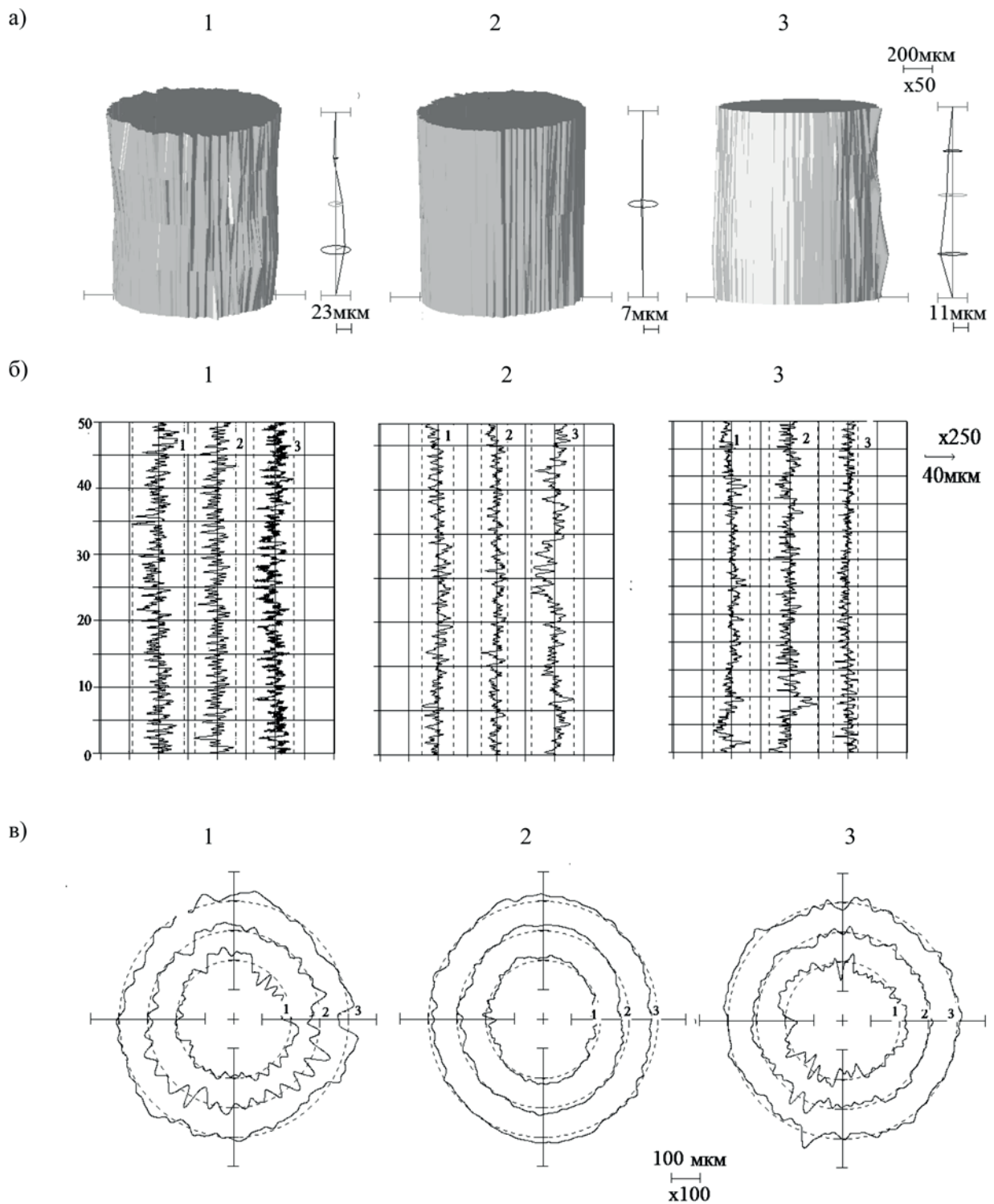


Рис. 3. Отклонения формы деталей из капролона после токарной обработки:  
 а – отклонение от цилиндричности; б – отклонение от прямолинейности образующей;  
 в – отклонение от круглости; 1 – базовый вариант; 2 – сжатие и нагрев;  
 3 – растяжение и нагрев

### Производственные испытания

В данном разделе представлены результаты производственных испытаний подшипниковых опор скольжения, выполненных из капролона *B* и установленных в блоке подшипников привода шнекового питателя установки по производству резинотехнических изделий. Данная установка смонтирована на ОАО «Дальэнергомаш» в г. Хабаровск.

Цель испытаний – исследование влияния качества обработанной поверхности подшипниковых опор из капролона на эффективность работы блока подшипников данной установки. Испытаниям последовательно подвергались две опоры скольжения. Посадочные поверхности первой опоры были обработаны по обычной технологии с применением традиционных режимов резания, выбранных на основе данных литературы [6; 7]. При точении опоры № 2 заготовка подвергалась предварительному воздействию, а именно опережающей обработке в виде механического деформирования поверхностного слоя материала. Давление предварительного деформирования заготовки составляло 1 МПа. Численные значения параметров шероховатости обработанных посадочных поверхностей для испытуемых образцов представлены в табл. 2. Как следует из анализа сведенных в табл. 2 экспериментальных данных, опора № 2 имеет более качественную обработанную поверхность, что является подтверждением ранее полученных результатов.

Таблица 2

Параметры шероховатости посадочной поверхности исследуемых подшипниковых опор из капролона

Исследуемая опора	Параметры шероховатости, мкм						
	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$R_p$	$R_m$	$S_m$	$S_k$
Опора № 1 (точение без предварительной обработки заготовки)	12,6	32,6	24,5	12,8	26,7	0,6	0,38
Опора № 2 (точение после предварительного сжатия и нагрева заготовки)	4,39	5,68	9,02	5,32	3,7	1,4	-0,17

После установки в блок подшипников каждая опора из капролона эксплуатировалась в течение 120 ч, после чего производилась ее вибродиагностика. Вибродиагностика подшипников производилась по стандартной методике с применением прибора «Виброанализатор СД-21» [8]. В качестве выходных оценок эффективности работы опор использовались амплитуда (мкм), виброскорость (мм/с) и виброускорение (мм/с<sup>2</sup>) (рис. 4, 5, 6).

Анализ представленных на рис. 4, 5, 6 графических зависимостей показывает, что применение опоры № 2, изготовленной в соответствии с представленным выше способом, обеспечивает более эффективную работу подшипникового узла и всей установки. Об этом свидетельствуют более низкие значения контролируемых вибропараметров по сравнению с аналогичными для опоры № 1, что, безусловно, обеспечивается более низким уровнем шероховатости обработанной посадочной поверхности опоры № 2.

### Выводы

1. На основании экспериментальных исследований доказано, что создание предварительных напряжений величиной до 0,6 – 0,8 предела вынужденной эластичности материала при сжатии заготовок из капролона и применение предварительного нагрева заготовок до 60 °С позволило снизить до пяти раз среднее арифметическое отклонение профиля обработанной впоследствии точением поверхности заготовки.

2. Установлено, что создание предварительных напряжений величиной до 0,6 – 0,8 предела вынужденной эластичности материала при сжатии заготовок из капролона и применение предварительного нагрева заготовок до 60 °С приводит к снижению таких показателей отклонений формы обработанных поверхностей, как некруглость и нецилиндричность; от-

клонения от прямолинейности имеют примерно равные значения независимо от варианта обработки или снижаются незначительно.

3. Результаты производственных испытаний полностью подтверждают целесообразность применения предварительного термомеханического воздействия на заготовки из капролона, т.к. реализация такого подхода в конечном итоге позволила снизить уровень виброколебаний блока подшипников промышленной установки по производству резинотехнических изделий.

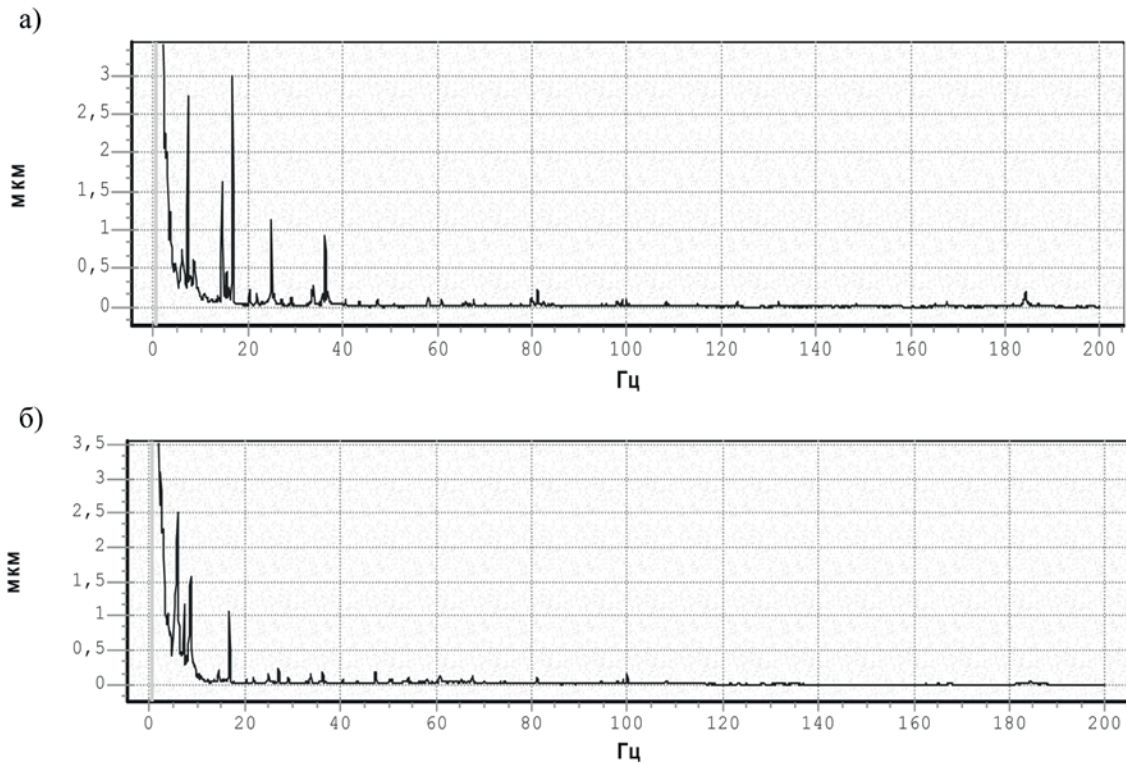


Рис. 4. Амплитуда колебаний: а – опора № 1; б – опора № 2

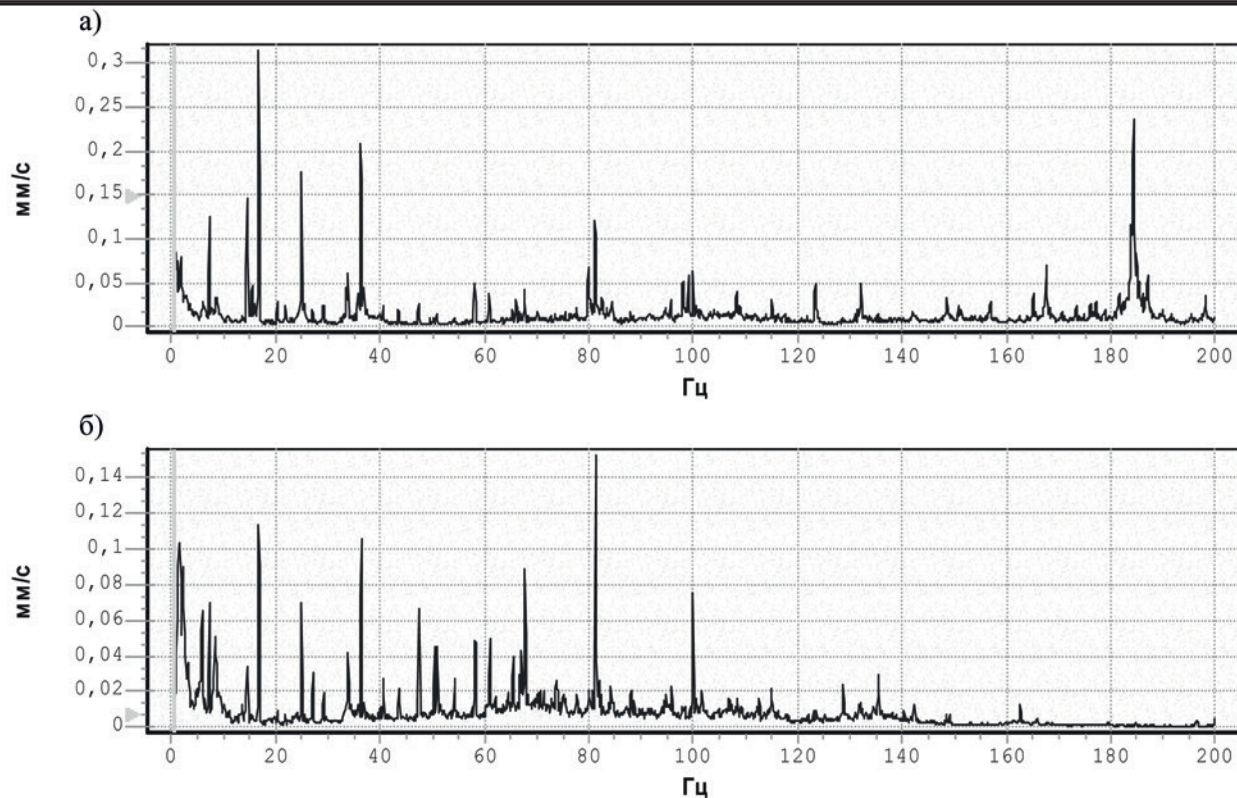


Рис. 5. Виброскорость колебаний: а – опора № 1; б – опора № 2

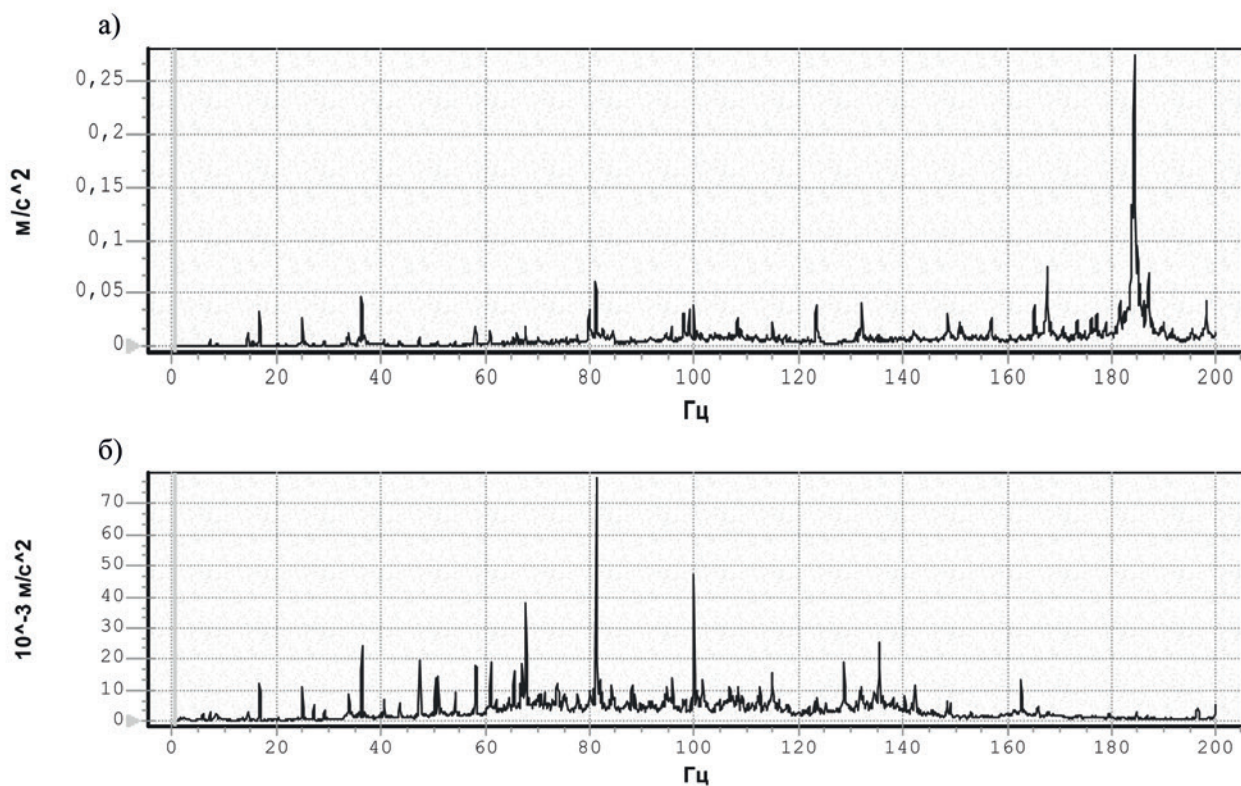


Рис. 6. Виброускорение колебаний: а – опора № 1; б – опора № 2

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карташов, Э. М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э. М. Карташов, Б. Цой, В. В. Шевелев. – М.: Химия, 2002. – 736 с.
2. Пат. 2317196 Российская федерация, (51) МПК В 29 С 37/00. Способ обработки заготовок из пластмасс / О. Ю. Еренков, А. В. Гаврилова. – № 2006138533/12; заявл. 03.04.06; опубл. 20.02.08. Бюл. № 5. – 3 с.
3. Журков, С. Н. Кинетическая природа прочности твердых тел / С. Н. Журков // Физика твердого тела. – 1987. – Т. 29. – № 1.
4. Еренков, О. Ю. Новые комбинированные способы обработки полимерных материалов резанием на основе предварительных физико-химических и механических воздействий / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Хосен Ри. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 219 с.
5. Еренков, О. Ю. Математическая модель нелинейных колебаний и определение условий неустойчивости технологической системы при точении / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(1). – С. 45-51.
6. Еренков, О. Ю. Обработка полимерных материалов резанием на основе обеспечения стабильности технологической системы и предварительных внешних воздействий на заготовки / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Ри Хосен [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 270 с.
7. Еренков, О. Ю. Совершенствование технологии механической обработки заготовок из капролона / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко, Е. В. Фалеева. – Хабаровск: ДВГУПС, 2011. – 146 с.
8. ГОСТ Р ИСО 7919-3-99. Контроль состояния машин по результатам измерений вибраций на вращающихся валах. – Введ. 1999-12-23. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 12 с.



**Космынин А. В., Щетинин В. С., Ваньков А. А.**  
**A. V. Kosmynin, V. S. Shchetinin, A. A. Vankov**

**МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА НА ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ**

**METHOD FOR DETERMINING THE IMPACT OF OPERATING AND DESIGN PARAMETERS ON THE ROTOR MOVEMENT TRAJECTORY IN THE GAS-STATIC BEARINGS**

**Космынин Александр Витальевич** – доктор технических наук, профессор, декан факультета энергетики, транспорта и морских технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: avkosm@knastu.ru.

**Alexander V. Kosmynin** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Power Engineering, Transport and Marine Technologies Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: avkosm@knastu.ru

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры машины и аппараты химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Engineering, Professor, Chemical Production Machinery and equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: schetynin@mail.ru

**Ваньков Алексей Александрович** – аспирант кафедры технология машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681008, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Лазо 80. E-mail: vankov@gmail.com

**Aleksey A. Vankov** – Postgraduate, Machine building technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681008, Komsomolsk-on-Amur, str. Lazo 80. E-mail: vankov@gmail.com

**Аннотация.** Описаны методики определения траектории движения оси ротора в зависимости от конструктивных особенностей бесконтактных опор, выделены недостатки и особенности математических моделей, лежащих в основе расчета в этих методах.

**Summary.** The methods for determining the rotor axis trajectory, depending on the design features of non-contact bearings. The authors highlighted defects and peculiarities of mathematical models underlying the calculation of these methods.

**Ключевые слова:** частотные колебания, конструктивные особенности, численный метод, метод начальных параметров, метод конечных элементов.

**Key words:** frequency fluctuations, structural features, numerical method, the initial parameters, the finite element method.

УДК 621.822.574

Точная и надежная работа металлорежущего оборудования во многом зависит от конструктивных особенностей шпиндельного узла (ШУ), его принципа регулировки и динамических характеристик, также соответствия современным рабочим характеристикам: скорост-

ной параметр должен составлять  $5 \cdot 10^5$  мм·мин<sup>-1</sup>, при этом точность вращения не менее 0,5 мкм с возможной обработкой поверхностей 10...60 мм. Все эти современные показатели возможно достичь благодаря применению в ШУ бесконтактных опор.

В настоящее время существуют работы [7; 8; 4] по исследованию динамики ШУ на различных опорах. Литературы по исследованию конкретно газостатических опор на порядок меньше, можно принять во внимания такие работы, как [1; 10; 2]. В основе вышеуказанных работ лежит математическая модель, сегодня используют два метода для вывода мат. модели динамических колебаний ШУ в зависимости от его конструктивных и режимных параметров – это «метод начальных параметров» (МНП) и «метод конечных элементов» (МКЭ). На основе «МНП» в «МГТУ» под руководством Ф. С. Сабирова была написана программа «SpinDina», которая позволяет делать автоматизированный расчет статических и динамических характеристик ШУ на опорах качения в зависимости от конструктивных характеристик ротора. Была поставлена задача разработки научно-обоснованной методики по исследованию точности вращения шпинделя на основе создания математической модели, алгоритма и программы для расчета траектории движения оси высокоскоростного ротора на газостатических опорах в зависимости от его конструктивных особенностей.

Проблемой в описании динамики вращения шпинделя на газовых опорах является расчет уравнений распределения давлений газа между подшипником и шпинделем.

За основу исследования берется динамическая модель, разработанная В. Д. Жесткой, которая основывалась на численном методе анализа движения ротора – МКЭ, недостатком этой модели является то, что в нее сложно включить такие характеристики, как жесткость, демпфирование, т.к. система уравнений получится слишком сложной для решения, также в этом методе нельзя учитывать конструктивные особенности подшипника, то есть поставлена двумерная задача.

Уравнение для определения траектории движения оси шпинделя:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_m \psi_{m+1} + \frac{1}{2} \varepsilon_{m+1} \psi_{m+1} - \frac{1}{2} \varepsilon_{m-1} \psi_{m+1} - \frac{1}{2} \varepsilon_{m+1} \psi_{m-1} = 2\varepsilon_m \psi_m - \varepsilon_m \psi_{m-1} - \\ - \frac{1}{2} \varepsilon_{m-1} \psi_{m-1} + A(S_{1m} \sin \psi_m - S_{2m} \cos \psi_m - a_1 \sin \psi_m + a_2 \cos \psi_m); \\ \varepsilon_{m+1} - \frac{1}{4} \varepsilon_m \psi_{m+1}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_m \psi_{m-1} \psi_{m+1} = 2\varepsilon_m - \varepsilon_{m-1} + \frac{1}{4} \varepsilon_m \psi_{m-1}^2 + \\ + A(-S_{1m} \cos \psi_m - S_{2m} \sin \psi_m + a_1 \cos \psi_m + a_2 \sin \psi_m). \end{array} \right. \quad (1)$$

Уравнение составлено на основе неизменной скорости вращения шпинделя и неизменяемом давлении газа по толщине смазочного слоя и бесконечной длины подшипника без пористых вставок, все эти характеристики являются граничными условиями решения поставленной задачи. Для определения траектории движения шпинделя введем исходные данные, изменения которых приведут к изменению положения оси (см. рис. 1):  $R_1 = R_2 - c$ ;  $R_2 = 25$  мм;  $c = 5 \cdot 10^{-2}$  мм;  $n = 50000$  мин<sup>-1</sup>,  $\omega = 5000$  с<sup>-1</sup>, вращение происходит по часовой стрелке;  $e = 1 \cdot 10^{-2}$  мм;  $\varepsilon = \frac{e}{c} = 0,2$ ;  $\mu = 2 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $p_0 = 0,1$  Мпа.

Подставим:

$$\frac{c}{R} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{25} = 0,002.$$

После определений поля давления газа [3] перейдем к вычислению параметра А для дальнейшего определения  $\varepsilon_m$  и  $\psi_m$  по уравнению (1)

$$A = \frac{P_0}{m\omega^2} \frac{c}{R} \Delta\varphi(\Delta\bar{t})^2 = \frac{10^5}{4,875\pi \cdot 5000^2} \cdot 0,002 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot 0,1^2 = 2,735 \cdot 10^{-9}.$$

Далее положение точек задается декартовыми ординатами  $x = \sin \psi \cdot \varepsilon$ ,  $y = \cos \psi \cdot \varepsilon$  по времени от 0 до  $12\Delta t$ .

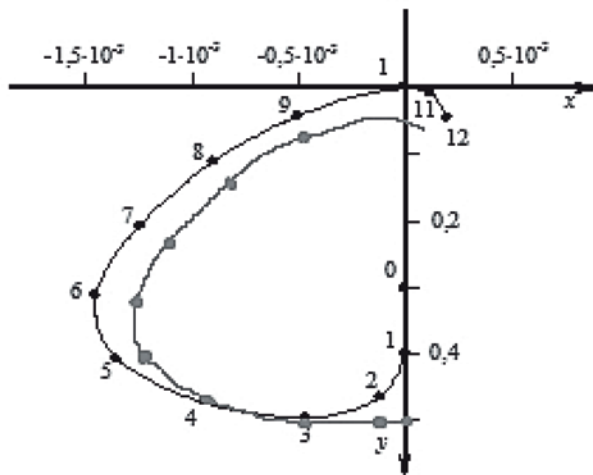


Рис. 1. Траектория движения оси шпинделя

Данные теоретические исследования были проверены на экспериментальном стенде (см. рис. 2). Обозначения: вал – 1; передний – 2 и задний – 3 радиальные газостатические подшипники с пористыми вставками; нагрузочный подшипник – 4; опорные стойки – 5, 6; корпус подшипников – 7; кольцо – 8; подпятники – 9, 10; водомаслоотделитель – 11; стойка корпуса турбины – 12; клапан подвода воздуха к подшипникам – 13; клапан подвода воздуха к турбине – 14; сопловой аппарат турбины – 15; корпус турбины – 16; рабочее колесо – 17; гибкая связь – 18; клапан подвода воздуха к нагрузочному поршню – 19; воздушный фильтр – 20; компрессор – 21; корпус нагрузочного поршня – 22; нагрузочный поршень – 23.

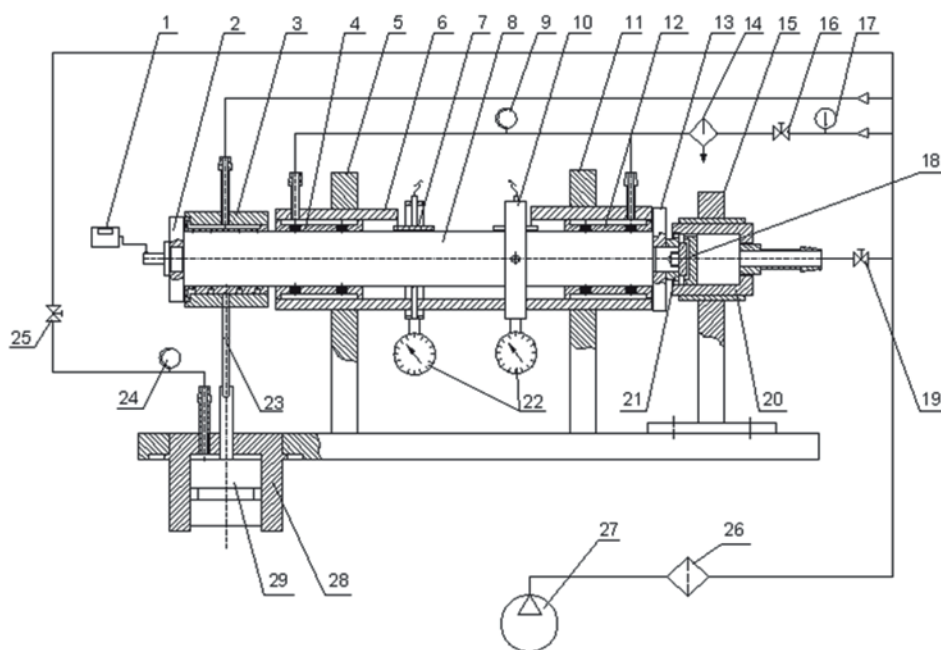


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла с газостатическими подшипниками

Методика В. Д. Жесткой проверена при определении эксплуатационных характеристик ШУ, таких как жесткость, несущая способность в зависимости от конструктивных особенностей ШУ.

Для определения выходных характеристик ШУ в зависимости от конструктивных параметров в МГТУ «Станкин» под руководством Ф. С. Сабирова был разработан программный комплекс «Srun Dina», модель вычислений этого комплекса основывается на МНП, его основные достоинства состоят в том, что в расчете участвуют непосредственные характеристики, такие как: жесткость, демпфирование, которые могут определяться экспериментально или задаваться из справочников. Причем параметры этих элементов могут задаваться в виде их собственных частотных характеристик. При большом количестве элементов не требуется решения большой системы уравнений, которая в случае экспериментально полученных данных может оказаться плохо обусловленной. В зависимости от степени детализации модели МНП можно отнести как к приближенным, так и к точным методам расчета [9].

После внесения всех конструктивных параметров ШУ и степени нагрузки на шлифовальный круг (см. рис. 3) переходим во вкладку «Расчет», где исходя из указанных характеристик ШУ строится график амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) для определения частотных колебаний (см. рис. 4).

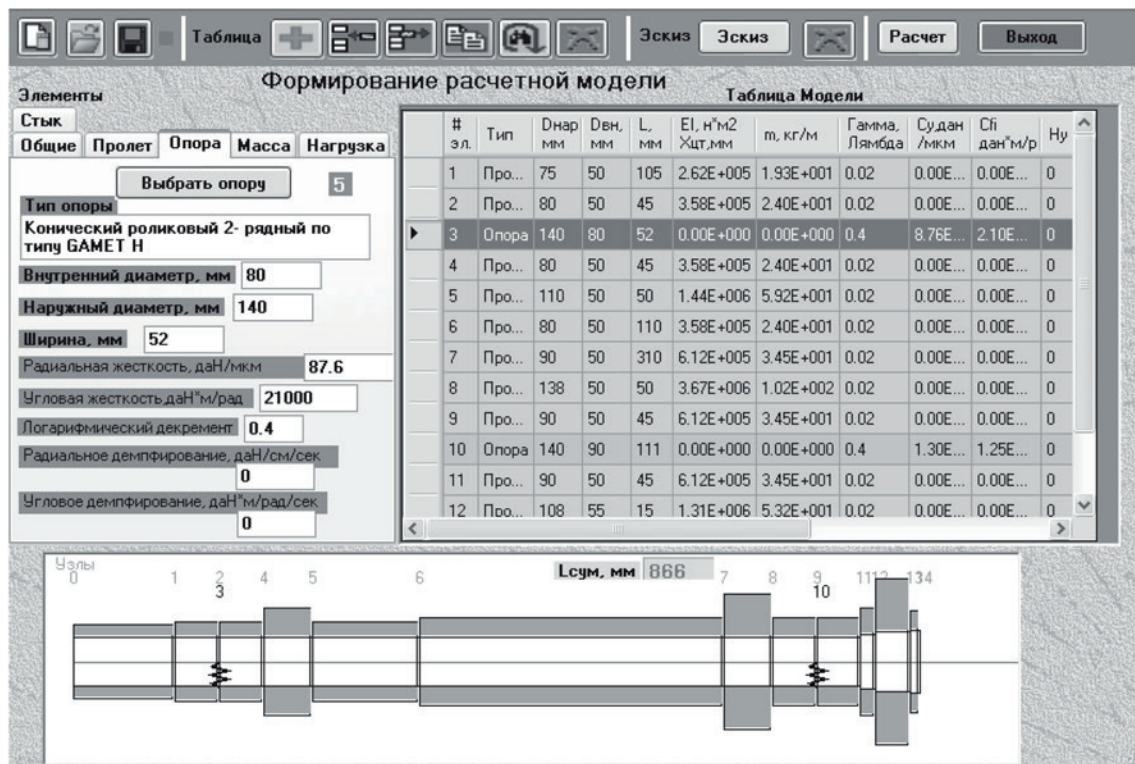


Рис. 3. Формирование расчетной модели Srun Dina

Вышеописанный программный комплекс Srun Dina по причине сложности расчета газовой составляющей не позволяет делать расчет газостатических подшипников, а только подшипников качения.

Выводы. В настоящее время происходит разработка мат. модели, на основе которой планируется написание методики, по которой возможно произвести расчет поля давления газа в зависимости от конструктивных параметров ШУ. С помощью написанной мат. модели будет возможным построение алгоритма определения траектории движения ШУ для газостатического подшипника.

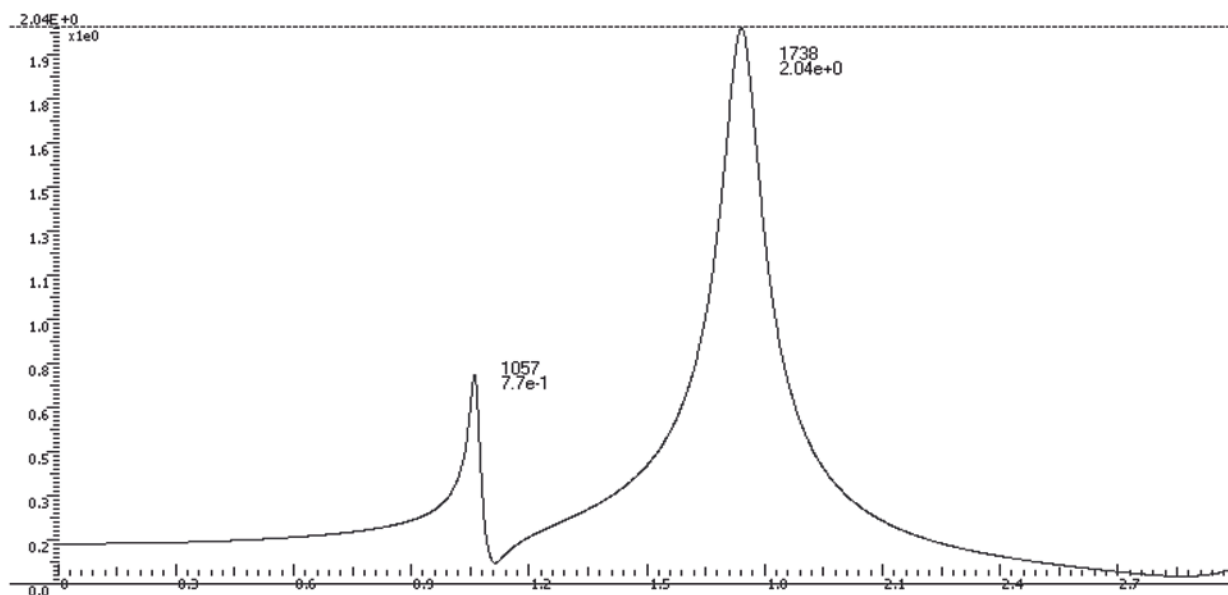


Рис. 4. Пример частотной характеристики

Также задачей алгоритма определения динамики ШУ на газовых опорах помимо расчетной составляющей является задача построения графиков АФЧХ для вывода закономерностей их изменений при различных конструктивных параметрах с постановкой выводов и рекомендаций по применению ШУ для достижения желаемого качества обработки определенных типов поверхностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Космынин, А. В. Основы проектирования высокоскоростных шпиндельных узлов на газомангнитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 181 с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, Ю. Г. Кабалдин, В. С. Виноградов, С. П. Чернобай. – М.: Академия естествознания, 2006. – 219 с.
3. Космынин, А. В. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем: моногр. В 2 ч / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014.
4. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах: моногр. / А. В. Космынин, В. И. Шаломов, В. С. Щетинин, В. Д. Жесткая, А. С. Хвостиков, А. В. Смирнов. – М.: Издательский дом «Академия естествознания», 2011. – 178 с.
5. Газомангнитные опоры высокоскоростных роторных систем: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова, А. С. Хвостиков. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 132 с.
6. Магнитные и магнитогиродинамические опоры / сост. В. Б. Метлин; под ред. А. И. Бертинова. – М.: Энергия, 1968.
7. Пуш, А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А. В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
8. Диагностика, моделирование и расчет шпиндельных узлов станков / Ф. С. Сабиров, Н. А. Кочинев, М. П. Козочкин, В. С. Хомяков, Д. Н. Суслов, В. В. Сенькина // Комплект: ИТО. – 2009. – № 3. – С. 52-54.
9. Хомяков, В. С. Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов / В. С. Хомяков, Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабиров // СТИН. – № 3. – 2009. – С. 5-9.
10. Космынин, А. В. Совершенствование высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах за счет применения газомангнитных подшипников / А. В. Космынин, В. С. Щетинин // Ученые записки КнАГТУ. Науки природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 65-68.

Шишкин Б. В.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО ВИНТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СИЛОЙ, НОРМАЛЬНОЙ К ПЛОСКОСТИ СТЫКА

**Шишкин Б. В.**  
**B. V. Shishkin**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО ВИНТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СИЛОЙ, НОРМАЛЬНОЙ К ПЛОСКОСТИ СТЫКА**

### **GROUP SCREW CONNECTION DESIGN WITH FORCE LOADING, REASONABLE TO THE LINE OF JOINT**

**Шишкин Борис Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: usu@knastu.ru.

**Mr. Boris V. Shishkin** – PHD in Engineering, Assistant Professor, Machines and Devices of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University ( Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: usu@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности проектирования групповых винтовых соединений, отвечающих критерию плотности стыка. В качестве изменяемых параметров стыка использованы: число винтов, их расположение, число контактирующих площадок. В результате снижены неравномерность давления по поверхности стыка и суммарная масса крепёжных винтов.

**Summary.** The article features the group screw connection design that meets the criteria of joint density. The author regards the following changeable parameters of a joint: number of screws, their arrangement, and number of contacting platforms. As a result, nonuniformity of pressure on joint surface, and the total mass of the fixing screws are reduced.

**Ключевые слова:** стык, винт, центр масс стыка, центр масс винтов, давление в стыке.

**Key words:** a joint, a screw, the centre of joint mass, the centre of screw mass, pressure in a joint.

УДК 621.882

При проектировании всего аппарата возможно моделирование процесса соединения его частей [2]. Многие узлы в машинах крепятся к основанию несколькими винтами (болтами), произвольно расположенными в пространстве. Число винтов и их размещение в этом групповом соединении, а также форма и размеры опорной плоскости задаются в процессе проектирования машины. В машиностроении наиболее распространены плоские контактные поверхности – плоские стыки.

В расчётах используется гипотеза о том, что давление сжатия  $p_i$  по плоскости стыка от предварительной затяжки распределяется по линейному закону [1]. Согласно гипотезе стык плоский до нагружения остаётся плоским и под действием внешних сил. Это характерно для соединений, у которых деформации изгиба соединяемых узлов пренебрежимо малы. В практике такие соединения преобладают, а использование гипотезы значительно упрощает расчёты.

Примем оси координат  $x, y$  в качестве осей, лежащих в плоскости стыка (см. рис. 1). В общем случае стыковое соединение нагружается системой силовых факторов: сил и моментов. Указанную систему можно перенести в центр масс стыка и свести её к эквивалентной силе  $F$ , нормальной к плоскости стыка, и опрокидывающему моменту  $M$ , который представляют в виде суммы проекций на две взаимно перпендикулярные оси ( $M_x, M_y$ ), за которые принимают главные оси [3].

При проектировании необходимо определить величину предварительной затяжки винтов, обеспечивающую гарантированный плотный контакт поверхностей соединяемых узлов между собой. Результатом действия предварительной затяжки винтов является давле-

ние в стыке  $p_0$ . По всей плоскости стыка при нагружении эквивалентной силой и опрокидывающим моментом должно быть обеспечено давление сжатия  $p_i$  на площадке с произвольными координатами  $x$  и  $y$ . Величина  $p_i$  определяется суммой компонентов:

$$p_i = p_0 + \Delta F + \Delta M_x + \Delta M_y, \quad (1)$$

где  $\Delta F$ ,  $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$  – компоненты давлений от внешних силовых факторов в  $i$ -й точке стыка.

Чтобы гарантировать плотность (нераскрытие) стыка, необходимо обеспечить для любой точки стыка минимальное давление:

$$p_{\min} = \min(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_N) \geq 0, \quad (2)$$

где  $p_i$  – давление в одной из множества  $N$  точек поверхности стыка.

Проектируя винтовое соединение, конструктор предусматривает наличие осей симметрии стыка (одной или двух). При размещении болтов по сечению симметричного стыка необходимо совместить или расположить на минимально возможном расстоянии центр масс винтов и центр масс стыка.

Если центр масс винтов отстоит на значительную величину от центра масс стыка, то выполнение неравенства (2) станет невозможным даже при наличии в выражении (1) только первого слагаемого. В этом случае даже при осуществлении затяжки стыка возможно возникновение в отдельных точках стыка давления

$$p_{\min} \leq 0. \quad (3)$$

При создании групповых винтовых соединений достаточно часто стык оказывается несимметричным по требованиям, предъявляемым к конструкции изделия машиностроения. Обеспечить совпадение центра масс винтов и центра масс стыка на начальных стадиях проектирования достаточно проблематично. Упорядочить процедуру проектирования группового винтового соединения возможно при использовании различных вариантов программных комплексов создания машиностроительных конструкций.

Групповые винтовые соединения возможно рассчитывать по критериям (2) и (3) и создавать конструкцию с помощью модуля APM Joint программного продукта автоматизированного проектирования APM WinMashine научно-технического центра «Автоматизированное проектирование машин». При этом значительно снижается трудоёмкость расчётов по сравнению с известным вариантом решения [1] и, как правило, обеспечивается возможность оптимизации конструкции по различным критериям.

Рассмотрим проектирование группового винтового соединения под действием постоянного внешнего нагружения, раскрывающего стык. Опорная плоскость выполнена несимметричной. Отсутствует также симметрия в расположении винтов соединения.

Рекомендуется следующий порядок расчёта:

1. Первым шагом необходимо выбрать тип соединения: «Болтовое с зазором». В этом случае при проектировании учитываются все виды действующих на стык поверхностей нагрузок.

2. В основном окне модуля APM Joint представим геометрию плоского стыка, образованного местами соприкосновения узлов в машине. Представим произвольный контур стыка в координатных осях  $x$ ,  $y$  в виде двух прямоугольных площадок (см. рис. 1). Оси симметрии в представленном стыке отсутствуют. Стык состоит из двух площадок соприкосновения, которые определяются при нажатии кнопки «Внешний контур».

3. На винтовое соединение действует известная раскрывающая стык внешняя сила  $F$ , перпендикулярная плоскости  $xoy$ . Точка приложения силы выбрана произвольно и указана на рис. 1.

4. При установке винтов воспользуемся кнопкой «Болты». Установим минимальное количество винтов два (положение отмечено крестом), что рекомендуется для крепления в случае продолговатых прямоугольных площадок и обеспечения равномерного давления по

площадке. При первоначальной компоновке соединения разнесём винты по площадкам на максимально возможное расстояние, определяемое её длиной.

5. Выполняем «Проектировочный расчёт», используя меню «Расчёт». Для принятой на рис. 1 конструкции винтового соединения на отдельных площадках максимальное давление по контуру стыка будет в несколько раз превосходить минимальное допустимое по условию нераскрытия стыка (2). При этом обнаруживается значительное несовпадение центра масс стыка и центра масс винтов.

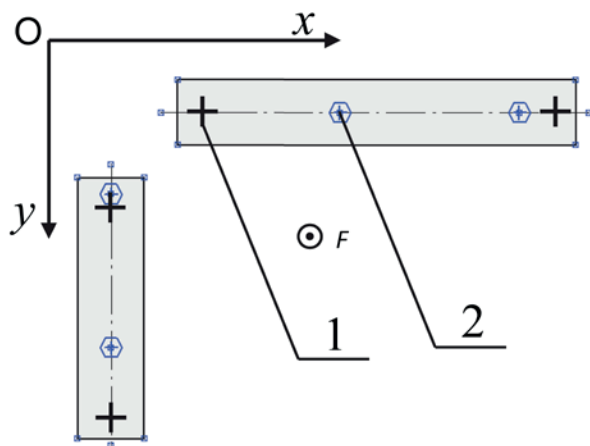


Рис. 1. Стык из двух площадок, затянутый четырьмя винтами:  
1 – первоначальное положение винтов при компоновке; 2 – положение винтов при совпадении центра масс винтов с центром масс стыка

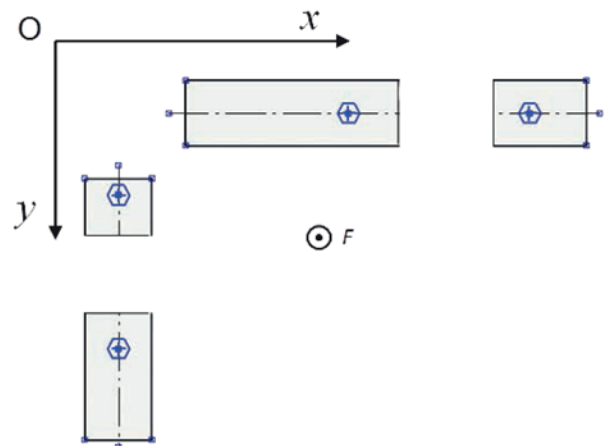


Рис. 2. Стык из четырёх площадок

6. Выполним перемещение крепящих винтов по прямоугольным площадкам в направлении осей  $x$  и  $y$ , чтобы центр масс винтов совпал с центром масс стыка. На рис. 1 это положение показано в виде шестигранных головок винтов. Это действие снижает максимальную нагрузку на винт и, как следствие, уменьшает диаметр винта.

7. Если продолжить перемещение винтов по площадкам без изменения их центра масс, то конструкция стыка может быть преобразована из четырёхвинтовой в двухвинтовую. На каждой площадке окажется по одному винту. Такое преобразование чаще всего не снижает суммарную массу крепёжных винтов, но при этом резко, в 2...5 раз, возрастает отношение максимального к минимальному давлению по площадкам стыка.

8. После выполнения шестого шага возможно размещение дополнительных винтов между двух, отмеченных на каждой площадке. Первоначально можно установить третий винт на длинной площадке, ориентированной вдоль оси  $x$ , затем, перемещая винты, добиться совпадения центра масс стыка и центра масс винтов. В итоге можно уменьшить диаметр винтов и их суммарный вес, снизить давление по стыку. Дальнейшее увеличение количества винтов по обеим площадкам ограничивается различными критериями: весом изделия, возможностью сборки конструкции и др.

9. Для снижения трудоёмкости станочной обработки поверхности контактирующих площадок часто их разбивают на несколько коротких. В представленном примере разобьём обе площадки (см. рис. 1) на две каждую. При этом уменьшим длину каждой площадки (см. рис. 1) на 1/4 от первоначальной. На рис. 2 представлена конфигурация модернизированного стыка из четырёх площадок. В результате предпринятых изменений произойдёт смещение

центра масс стыка. Одновременно понижается отношение максимального к минимальному давлению по площадкам стыка в 1,5 раза. Также снижается максимальное значение давления  $p_i$  и нагрузка на винты на 10 % от первоначальной. Для оптимизации нагрузок на элементы соединения требуется повторить все действия начиная с пятого шага представленного алгоритма для приближения центра масс стыка и центра масс винтов. Перемещение винтов вдоль осей  $x$  и  $y$  будет ограничено размером площадок. Если позволяют конструктивные ограничения, рекомендуется выполнить смещение и самой площадки для приближения центра масс стыка к центру масс винтов.

Выводы:

1. Рекомендуемое применение аппарата программы АРМ WinMashine при расчёте группового винтового соединения приводит к снижению давлений в стыке.
2. Оптимальное проектирование группового винтового соединения позволяет уменьшить диаметры винтов и их суммарную материалоемкость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер, И. А. Резьбовые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
2. Олейников, А. И. Моделирование и расчёт процесса клёпки изделий / А. И. Олейников, К. С. Бормотин, А. М. Ноговицын // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14). – С. 41-48.
3. Шелофаст, В. В. Основы проектирования машин / В. В. Шелофаст. – М.: Изд-во АПМ, 2005. – 472 с.

**Лелюхин В. Е., Колесникова О. В.**  
**V. E. Lelyukhin, O. V. Kolesnikova**

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАНА МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО  
МЕЛКОСЕРИЙНОГО И ЕДИНИЧНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

**THE METHOD OF GENERATING A PLAN IN MULTIPRODUCT LOW-RATE  
AND SINGLE MACHINERY PRODUCTION**

**Лелюхин Владимир Егорович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии промышленного производства» ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», заместитель генерального директора ООО «Технологическое оборудование» (Россия, г. Владивосток); тел. +7(914)7235257. E-mail: lelv0@mail.ru.

**Mr. Vladimir E. Lelyukhin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University, Deputy Director General, LLC «Technological equipment» (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)7235257. E-mail: lelv0@mail.ru.

**Колесникова Ольга Валерьевна** – старший преподаватель кафедры «Технологии промышленного производства» ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (Россия, г. Владивосток); тел. +7(914)6529780. E-mail: miis@mail.ru.

**Ms. Olga V. Kolesnikova** – senior lecturer, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)6529780. E-mail: miis@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассматривается оригинальный метод формирования оперативно-текущего плана многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства с использованием структурно-параметрической модели конструкторско-технологического образа изделия. Основной проблемой задачи формирования расписаний является большая размерность исходных данных, что не позволяет получать на практике решения в приемлемых временных рамках. Авторами предлагается метод формирования расписания для изделий с размерностью, превышающей несколько тысяч деталей-сборочных единиц, в условиях реальной загрузки технологического оборудования на предприятии. Рассматриваемая задача заключается в нахождении допустимого варианта расстановки полного множества технологических операций с учётом отношений предшествования и ограничений на ресурсы для любого одиночного планируемого заказа. Изложенный метод лёг в основу разработки на платформе 1С:УПП системы управления для предприятий с мелкосерийным и единичным характером производства, позволившей существенно сократить сроки и повысить точность планирования.

**Summary.** The paper presents an original method of generating the operational plan in multiproduct low-rate and single production with the use of structure-parametric model of design and technological image of the product. The main problem of constructing a schedule is the large dimension of output data that does not permit the solution in an acceptable time frame. The authors propose a method of forming a schedule for products with a dimension greater than a few thousands of parts and assembly units in terms of technological equipment real loading at the enterprise. The problem is to find valid options for a full set of technological operation placement taking into account the preceding relations and resource limits for any single planned order. The above-mentioned method was used to develop the control system on the platform 1С: UPP for enterprises with low-rate production character. This fact allowed reducing significantly the time and improving the accuracy of planning.

**Ключевые слова:** управление производством, машиностроение, составление расписания, алгоритм планирования, конструкторско-технологическая подготовка, мелкосерийное производство.

**Key words:** production management, engineering, scheduling, planning algorithm, design and technological training, low-rate production.

УДК 658.523:658.5.011

### Введение

Организация и управление производством машиностроительного предприятия являются актуальными задачами. Построение эффективной системы циркуляции информационных, материальных, финансовых потоков, а также их успешного взаимодействия позволяет существенно повысить эффективность всего производства. Для многономенклатурного машиностроительного производства с высоким коэффициентом закрепления операций и большим разнообразием выполняемых операций в рамках поступающих заказов особое значение приобретает качество планирования производства с детализацией до уровня загрузки рабочих мест.

Основанием для начала планирования является заказ покупателя, в котором определяется перечень изготавливаемой номенклатуры. По заказу покупателя формируются внутренние заказы на производство. Важным моментом при заключении договора с покупателем является определение срока исполнения заказа. Это зависит от сложности конструкции изделий, технологии их изготовления и особенно от текущей загрузки предприятия.

Получение реального плана производства, а по сути графика загрузки рабочих мест, определяется качеством конструкторско-технологической и производственной информации. На основании этой информации формируется перечень технологических операций, их связей и требуемых ресурсов (материалов, инструментов, комплектующих, рабочих мест). Для формирования плана производства необходимо использовать вышеуказанные данные, а также сведения о текущей загрузке рабочих мест и регламентах работы оборудования.

В статье рассматривается структурно-параметрическая модель конструкторско-технологического образа изделия и оригинальный метод формирования оперативно-текущего плана многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства с учётом реальной загрузки мощностей предприятия.

### Существующие подходы к формированию производственных планов

Задачи формирования производственных планов относятся к классу NP (*non-deterministic polynomial*) задач. Подавляющее количество задач, исследуемых в теории расписаний, являются NP-трудными. Несмотря на трудности, связанные с большим количеством перестановок, существует ряд методов и алгоритмов для решения этих задач.

В рассматриваемом случае интерес представляют задачи теории расписаний, связанные с построением расписаний выполнения работ на производственном предприятии (*MS – Machine Scheduling*). На сегодняшний день имеется трёхпозиционная система классификации  $\alpha/\beta/\gamma$ . Поле  $\alpha$  описывает характеристики задачи, связанные с рабочими местами. Значения в поле  $\beta$  уточняют характеристики обслуживания и ограничения, накладываемые на выполнение технологических процессов. Поле  $\gamma$  описывает целевую функцию задачи [8].

В соответствии с указанной классификацией к наиболее близкой можно отнести задачу построения планов на уровне цеха (*Shop Scheduling*), описываемую в книге А. А. Лазарева и Е. Р. Гафарова «Теория расписаний. Задачи и алгоритмы» [6]. В этой задаче каждый технологический процесс изготовления детали или сборочной единицы состоит из операций, выполнение которых может назначаться только на определённые рабочие места.

В общем случае дано  $m$  рабочих мест  $R := \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ , и каждый технологический процесс  $j$  содержит операции  $O_j := \{o_{1j}, o_{2j}, \dots, o_{n_j-1j}, o_{n_jj}\}$ . Между операциями заданы отношения предшествования (маршрут обработки детали). Две операции одного и того же технологического процесса не могут выполняться одновременно, и на каждом рабочем месте может выполняться одновременно только одна операция. Время выполнения операции  $o_{ij}$  равно  $t_{ij}$ , и она может выполняться на рабочем месте  $r_i \in R := \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  [6].

В такой модели план  $P := \{p_{r_1}, p_{r_2}, \dots, p_{r_m}\}$  можно представить как функцию трёх параметров: времени, рабочего места и размещения технологических операций:

$$P = P(T, R, O),$$

где  $T$  – время занятости рабочего места;  $R$  – множество рабочих мест;  $O$  – множество технологических операций.

Ввиду отсутствия общего метода, позволяющего в приемлемые сроки получать удовлетворительные решения указанной задачи, авторами предпринята попытка использования известных алгоритмов для частных случаев (*Flow-Shop*, *Open-Shop*, *Job-Shop*) с последующим преобразованием к задаче построения расписания выполнения работ проектов с учётом отношений предшествования и ограничений на ресурсы (RCPSP – *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*) [6].

Несмотря на упрощённое описание без учёта отношений предшествования между изделиями в заказе, детали-сборочными единицами (ДСЕ) и соответственно технологическими процессами, а также на существенные ограничения по количеству рассматриваемых элементов, большая размерность задачи формирования расписаний на практике не позволяет получать решения в приемлемых временных рамках.

Возникающие на практике задачи большой размерности решаются приближёнными методами. Методы решений условно можно разделить на две группы: конструктивные и улучшающие [7].

Конструктивные методы строят последовательные частичные решения (расписания), на каждом шаге добавляя к построенному расписанию ещё не запланированную операцию (или группу операций), добавление которой не нарушит условия допустимости. Выбор планируемой операции и её места в расписании определяется соответствующими правилами. На выходе конструктивного метода всегда получается допустимое расписание [7].

Улучшающие методы, используя некоторое допустимое расписание как начальное приближение к решению, строят его окрестность (локальными изменениями расписания) и затем находят в этой окрестности локальный минимум критерия оптимизации [7].

Для решения задачи RCPSP и её обобщений разрабатываются точные и приближённые методы. Среди точных методов наиболее производительным считается алгоритм Брукера на основе метода ветвей и границ [1]. Даже без дополнительных ограничений задача RCPSP остаётся экстремально NP-трудной. Лучший из известных точных алгоритмов Брукера за приемлемое время может решать примеры размерности (количество технологических процессов) не больше  $n = 60$  [6].

В статье предлагается метод формирования расписания для изделий с размерностью, превышающей несколько тысяч ДСЕ, в условиях реальной загрузки технологического оборудования на предприятии. В основу рассматриваемого подхода положен ряд постулатов и частных алгоритмов, разработанных авторами.

#### **Постановка задачи планирования**

Рассматриваемая задача заключается в нахождении допустимого варианта расстановки полного множества технологических операций с учётом отношений предшествования и ограничений на ресурсы для любого одиночного планируемого заказа. Под заказом понимается совокупность изделий, выпускаемых в рамках одного договора:  $z_i \in Z, Z := \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ . Обозначим множество изделий, которые может производить предприятие:  $U := \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ . Тогда любой конкретный заказ содержит некоторое подмножество множества изделий:

$$U^{z_i} := \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, U^{z_i} \subset U.$$

Каждое изделие в соответствии со своей структурой включает множество ДСЕ в соответствии с нижеприведённым выражением:

$$\forall u_j \in U^{z_i} \exists S^{u_j} \subset S, S := \{s_1, s_2, \dots, s_l\}. \quad (1)$$

Запись (1) означает, что для каждого изделия  $u_j$  из множества изделий в составе заказа  $U^{z_i}$  существует множество детали-сборочных единиц  $S^{u_j}$ , которое, в свою очередь, является подмножеством множества всех возможных ДСЕ.

Кроме того, изготовление ДСЕ выполняется в соответствии с технологическими процессами, состоящими из упорядоченной совокупности строго определённых технологических операций:

$$\forall s_j \in S^{u_i} \exists Tr \Leftrightarrow s_j, Tr := \{o_1, o_2, \dots, o_l\} \subset O := \{o_1, o_2, \dots, o_l, \dots, o_n\}.$$

Иными словами, для каждой изготавливаемой детали-сборочной единицы  $s_j$  (из множества детали-сборочных единиц  $S^{u_j}$ ) существует технологический процесс  $Tr_j$ , содержащий подмножество технологических операций ( $o_l$ ) из полного множества освоенных на предприятии операций.

Кроме того, на всём множестве операций  $O$  заданы два вида нереклексивных отношений (отношения предшествования):

1. отношение строгого порядка, характеризующее последовательность выполнения операций в пределах технологического процесса;
2. отношение частичного порядка между группами операций, объединённых технологическим процессом, с соответствующим индексом ДСЕ.

В качестве исходного пространства моделирования используется существующий на текущий момент времени производственный план с графиком реальной загрузки технологического оборудования.

Таким образом, множество технологических операций  $O$ , с одной стороны, находится в функциональном отношении с множеством рабочих мест  $R$ , а с другой стороны, это же множество состоит из подмножеств детали-операций, структурно связанных в технологические цепочки, строго соответствующие детали-сборочным единицам. Все ДСЕ, в свою очередь, тоже взаимосвязаны в соответствии со структурой изделия [4]. Соответственно, отношения предшествования определяются не только порядком следования технологических операций, но и порядком следования ДСЕ.

### Структурно-параметрическая модель производственного образа изделия

В отечественной практике структура изделия формально представляется в виде ациклического графа-дерева, вершины которого соответствуют компонентам (ДСЕ), а рёбра, соединяющие вершины, – отношениям (связям) между этими компонентами. Вершина, соответствующая изделию в целом, называется начальной или конечной в зависимости от выбранной системы ориентации (см. рис. 1) [2].

На рис. 1 вершинами графа (обозначены латинскими символами) являются ДСЕ, а дугами (стрелками) указаны взаимосвязи между ними. Цифры рядом с дугами указывают входимость ДСЕ в более верхний уровень, иными словами, количество деталей или сборочных единиц, применяемых в узле, на который указывает стрелка. В данном примере (см. рис. 1) вершина «А» в соответствии с направлением дуг (стрелок) является конечной.

Математически ориентированный граф  $G$  – это пара  $(V, E)$ , где  $V$  – конечное множество вершин (узлов, точек) графа  $V := \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , а  $E$  – некоторое множество пар вершин  $E := \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ , т.е. подмножество множества  $V \times V$  или бинарное отношение на  $V$ . Элементы  $E$  называют рёбрами (дугами, стрелками, связями). Для дуги  $e_j = (v_i, v_{i+k}) \in E$  вершина  $v_i$  называется началом  $e_j$ , а вершина  $v_{i+k}$  – концом  $e_j$ ; считается, что дуга  $e_j$  ведёт из  $v_i$  в  $v_{i+k}$  [3].

Таким образом, формально любое изделие может быть представлено в виде графа  $G(V, E)$ , при этом состав изделия описывается параметрами множества  $V$ , отображающими множество ДСЕ, а множество  $E$  содержит его структуру в виде описания отношений между ними.

Степенью или валентностью вершины  $v_i$  графа  $G$  называется число рёбер, инцидентных этой вершине. Обозначим степень вершины через  $s(v_i)$ . В рассматриваемом случае предполагается отсутствие петель, поскольку в дальнейшем моделировании структуры изделия их наличие не имеет смысла.

В ориентированном графе число исходящих из вершины дуг называют полустепенью исхода, а число входящих в данную вершину дуг – полустепенью захода. Значение полустепени исхода вершины, равное единице при нулевой полустепени захода, характеризует висячие или концевые вершины, которые в дальнейшем будем называть «листьями». На рис. 1 листьями являются вершины  $D, E, F$  и  $K$ .

Вершина, в которую входит несколько дуг, является сборочной единицей или узлом. Для сборочного узла характерным признаком является отличная от нуля полустепень захода. В соответствии с действующими отечественными стандартами представления конструкторской и технологической информации в сборочных единицах не существует полустепени захода меньше двух [2].

В результате конструкторско-технологическая структура изделия может быть представлена в виде графа, который получается из структуры изделия заменой вершин (ДСЕ) последовательностями технологических операций их изготовления (см. рис. 2).

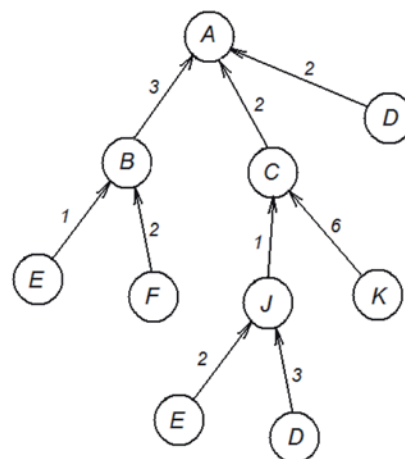


Рис. 1. Представление структуры изделия в виде ориентированного графа-дерева

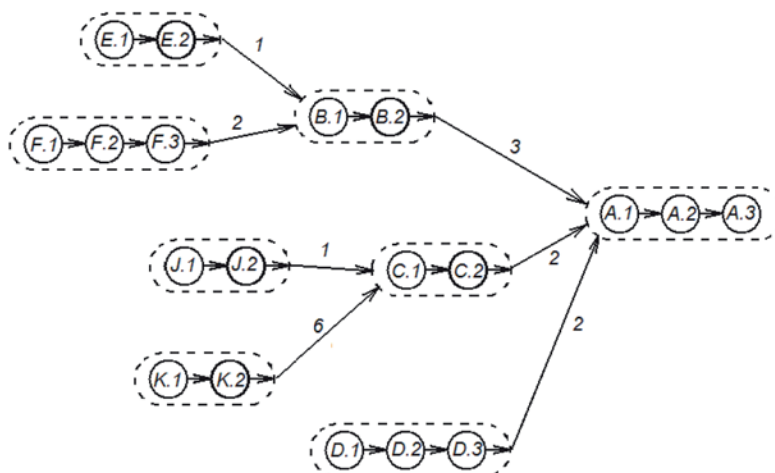


Рис. 2. Конструкторско-технологическая структура изделия в виде графа-дерева

Иными словами, граф структуры изделия  $G(V, E)$  задаётся множеством вершин (ДСЕ)  $V := \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$  и множеством связывающих их дуг  $E := \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,  $e_j = (v_i, v_{i+k})$ . Одновременно каждая вершина (ДСЕ) является подграфом  $V_i$ , описывающим технологический процесс изготовления этой ДСЕ. Подграф  $V_i := (O_{Vi}, E_{Vi})$  задаётся множеством вершин (технологических операций)  $O_{Vi} := \{o_1, o_2, \dots, o_k\}$ ,  $o_j \in O$  и множеством связывающих их дуг  $E_{Vi} := \{(o_1, o_2), (o_2, o_3), \dots, (o_{k-1}, o_k)\}$ .

Построенный таким образом граф представляет собой информационную модель конструкторско-технологической структуры изделия, содержащую как полный технологический состав элементов изделия в виде операций, так и полный перечень связей между ними, определяющий весь комплекс отношений предшествования.

## Предлагаемый метод формирования производственного расписания (плана)

В основу предлагаемого метода формирования плана положены следующие постулаты:

1. Существующий план загрузки оборудования считается «замороженным», т.е. запрещаются какие-либо перестановки технологических операций в плане.
2. Планирование осуществляется с любой заданной даты, не ранее текущей.
3. Расстановка операций в плане начинается с последней операции наиболее длинной цепи в конструкторско-технологической структуре планируемого изделия.
4. Для размещения операций в плане подбирается наиболее близкий (от даты начала планирования) незанятый (свободный) и достаточный для её размещения участок (отрезок рабочего времени) на соответствующем рабочем месте.

Такой метод гарантирует стопроцентную сходимость (получение приемлемого результата) для любых сочетаний изделий в заказе и комбинаций занятости технологического оборудования.

Зададим интервал доступности рабочего места дискретным множеством минут. Таким образом, доступность рабочих мест задаётся множеством  $D := \{D_{r1}, D_{r2}, \dots, D_{rm}\}$ .

При этом каждый элемент множества  $D_{ri}$  в свою очередь представляет множество состояний

$$D_{ri} := \{d_1^{ri}, d_2^{ri}, \dots, d_p^{ri}\},$$

где  $d_j^{ri}$  – состояние  $i$ -го рабочего места в течение  $j$ -й минуты.

Состояние любого рабочего места в каждую минуту характеризуется значением

$$d_j^{ri} = \begin{cases} 1, & \text{если занят,} \\ 0, & \text{если свободен.} \end{cases}$$

Длительность операции определяется временем её выполнения, т.е. количеством минут. При выполнении операции на рабочем месте минуты должны следовать одна за другой без перерыва.

На множестве технологических процессов  $O$  задан порядок, соответствующий электронной структуре изделия.

Расписанием изготовления одного изделия назовём вектор

$$P_V := \{p_{v1}, p_{v2}, \dots, p_{vn}\},$$

где  $p_{vj}$  – время начала изготовления детали-сборочной единицы  $v_j \in V$ .

С учётом того, что изготовление ДСЕ состоит из нескольких операций, тот же вектор расписания запишется в виде

$$P_V := \{p_{v1}^{o1}, p_{v1}^{o2}, \dots, p_{v1}^{ok}, p_{v2}^{o1}, \dots, p_{vn}^{om}\},$$

где  $p_{vj}^{oi}$  – время начала выполнения  $i$ -й операции детали-сборочной единицы  $v_j$ .

Момент времени, в который заканчивается выполнение операции, обозначим

$$f_{vj}^{oi} = p_{vj}^{oi} + \sum_{j=1}^z d_j^{rk},$$

где  $z$  – длительность выполнения операции  $o_j$ , равная количеству минут  $d_j^{rk}$ .

Моментом окончания изготовления детали-сборочной единицы  $v_j$  в расписании будет момент окончания последней технологической операции:

$$f_{p_{vj}} = \max_{i=1, \dots, l} f_{vj}^{oi}.$$

Тогда моментом окончания производства изделия или длиной расписания является величина

$$f_p = \max_{i=1, \dots, n} f_{p_{vi}}.$$

Расписание будет считаться допустимым, если в любой момент времени выполняется условие, при котором требования операций к использованию рабочих мест не превышают периода их доступности (суммарное время выполнения всех операций по изготовлению изделия не превышает времени работы всех рабочих мест в соответствии с графиком):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l (f_{vj}^{oi} - p_{vj}^{oi}) \leq \sum_{i=1}^m t_{ri},$$

а также соблюдаются ограничения порядка выполнения операций и обработки ДСЕ.

5. Для любых двух смежных вершин структуры изделия момент времени окончания обработки вершины (ДСЕ), являющейся началом дуги, должен быть меньше момента времени начала обработки вершины (ДСЕ), являющейся концом дуги:

$$\forall i, j : V_i \in N, V_j \in K, \Rightarrow f_{p_{vi}} < p_{vj}.$$

6. Для любых двух последовательных операций момент времени окончания операции, являющейся началом дуги, должен быть меньше момента времени начала операции, являющейся концом дуги

$$\forall j, k : o_j, o_k \in O_{vi}, o_j \in N, o_k \in K, \Rightarrow p_{vi}^{oj} + \sum_{l=1}^z d_l^{ri} < p_{vi}^{ok}.$$

В этом случае графиком загрузки рабочего места  $r_i$  является выборка периодов занятости данного рабочего места из общего расписания изготовления изделия.

Для определения последовательности рассмотрения технологических процессов при расстановке операций авторами разработан специализированный алгоритм под названием «Опадающие листья» [5].

Последовательность обработки деталей и узлов определяется в пределах каждого слоя. В первую очередь обрабатываются детали (сборочные единицы), имеющие самый длинный технологический цикл изготовления. Затем рассматриваются поочередно ДСЕ в порядке убывания длительности технологического цикла.

Для определения длины технологического (производственного) цикла составляется список вершин первого слоя (листьев), имеющих степень 1. Поскольку степенью вершины называется число рёбер, инцидентных ей, то в графе  $G = (V, E)$ , где  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  – множество вершин, а  $E = \{e_1, \dots, e_m\}$  – множество дуг, требуется найти вершины  $v_i \in V, \deg(v_i) = 1$ .

Далее для каждой вершины полученного множества определяется простая цепь, соединяющая вершину с корнем дерева:  $(v_0, e_1, v_1, e_2, \dots, v_{k-1}, e_k, v_k)$ , где  $v_{i-1}$  и  $v_i$  являются концами ребра  $e_i$ . Простая цепь в ориентированном графе имеет название «путь». Длиной пути называют количество составляющих его рёбер.

Несмотря на то, что метод предполагает максимизацию загрузки рабочих мест, реальный процент загрузки определяется комбинацией технологических структур планируемых для изготовления изделий.

**Алгоритм составления расписания**

Предлагаемый алгоритм формирует расписание для дискретного машиностроительного производства. Время в алгоритме дискретно и кратно одной минуте. Для записи алгоритма используются введенные ранее обозначения. Кроме того, введём для удобства дополнительные обозначения:

$LD$  – множество вершин графа, имеющих степень, равную единице, образующих один слой;

$Q$  – множество ресурсов (материал, инструмент, оснастка, покупные комплектующие);

$q_{ijk}$  – часть ресурса  $Q_k$ , предназначенного для выполнения операции  $o_{ij}$ ;

$pred(v_j)$  – множество технологических процессов, являющихся предшественниками технологических процессов  $v_j$ . С учётом определённой структуры изделия данное множество описывают в спецификации на сборочную единицу;

$bef(o_{ij})$  – параметр, задающий наличие смещения операции. В условиях выполнения операции указывается, что она должна быть выполнена не позже, чем заданный интервал времени.

В приведённом ниже алгоритме используются следующие подпрограммы:

– *РазузловатьИзделие* – подпрограмма составляет перечень ДСЕ (требований) по конструкторским спецификациям с учётом отношений предшествования и модифицирует дерево электронной структуры изделия, группируя одинаковые ДСЕ (требования).

– *ВыбратьЛистья* – подпрограмма формирует список ДСЕ (требований), не имеющих предшественников для обработки, и рассчитывает длину пути изготовления каждой ДСЕ, суммируя продолжительность изготовления всех последователей.

– *РазместитьОперацииСВременнымСмещением* – подпрограмма анализирует интервал смещения, формирует партии деталей для выполнения текущей и последующей операции. Подпрограмма используется в случаях, когда последующая операция должна быть выполнена не позже, чем указанный период времени.

– *ОпределитьРабочееМесто* – подпрограмма производит анализ группы заменяемости рабочих мест (оборудования), на основании установленного правила (наиболее ранее время начала и окончания операции с учётом графика работы и текущей занятости рабочих мест) выбирает рабочее место для размещения операции.

– *ЗапланироватьОперацию* – подпрограмма рассчитывает время выполнения операции с учётом подготовительно-заключительного времени и обрабатываемой партии деталей, размещает операцию с учётом графика работы и загрузки рабочего места, рассчитывает возможные моменты прерывания и возобновления операции.

– *МодифицироватьДерево* – подпрограмма удаляет из дерева электронной структуры изделия размещённые в расписании листья (требования), корректирует степени исхода вершин графа, готовит дерево для формирования нового списка листьев (требований).

*Основной алгоритм*

определить новое расписание на изделие  $P_V = \emptyset$ ;

*РазузловатьИзделие*( $V$ );

*ВыбратьЛистья*( $V, LD$ ); //формирование списка требований без предшественников

**Если**  $LD \neq \emptyset$  **Тогда** сортировать( $LD$ ); //установка порядка обработки требований по  
// правилу предпочтений

**Для каждого**  $v_j \in LD$  **выполнить**:

$$p_{v_j} = \max_{pred(v_j)} f_{v_j}^{onj}; // \text{время старта требования равно максимальному времени}$$

// окончания выполнения требований-предшественников

$$t = p_{v_j};$$

**Для каждого**  $o_{ji} \in v_j$  **выполнить**: // размещение операций

*Определить Рабочее Место*( $o_{j^i}, r^k$ );

**Если**  $bef(o_{ij})$  **Тогда**

*Разместить Операции* *С* *Временным Сместением*( $o_{j^i}, o_{j^{i+1}}, t$ );

**Иначе** *Запланировать Операцию*( $o_{j^i}, t$ );

Зарезервировать ресурсы на выполнение операции  $Q_k = Q_k - q_{jik}$

$t = f_{vj}^{oi}$ ;  $p_{vj}^{oi+1} = f_{vj}^{oi}$ ; // определить время окончания операции

$d_l^{rk} = 1, \forall t(d_l^{rk}) \in [p_{vj}^{oi}, f_{vj}^{oi}]$  // добавить операцию в расписание

**Конец;**

$f_{vj} = f_{vj}^{onj}$  // определить время выполнения требования

$LD = LD \setminus \{v_j\}$ ; // удалить требование из списка требований

**Конец;**

*Модифицировать Дерево;*

**Конец;**

### **Заключение**

Рассмотренная в статье модель формирования производственных планов явилась основой для практической реализации. Описанный алгоритм реализован с помощью серии дополнительно разработанных программных модулей на платформе 1С:УПП.

Изложенный метод лёг в основу разработки на платформе 1С:УПП системы управления для предприятий с мелкосерийным и единичным характером производства, позволившей существенно сократить сроки и повысить точность планирования. Например, формирование плана производства для изделия, содержащего более тысячи ДСЕ, осуществляется в течение часа.

Эта система внедрена на машиностроительном предприятии ОАО «Дальрыбтехцентр», изготавливающим технологическое оборудование для переработки рыбы и других морепродуктов. Система функционирует более года, и это позволило предприятию улучшить организацию и управление производством, что выразилось в повышении производительности труда рабочих более чем в два раза, улучшении качества выпускаемой продукции, снижении расхода материалов в среднем на 15 %, снижении себестоимости продукции в среднем на 20 %.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вакула, И. А. Об одной задаче планирования с ограниченными ресурсами / И. А. Вакула, А. Л. Гаврилюк // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений: сб. науч. трудов. Вып. 11. – Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2011. – С. 3-23.
2. ГОСТ 2.053-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения. – Введ. 2006-09-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.
3. Зыков, А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.
4. Колесникова, О. В. Структурно-параметрическое моделирование производственных планов / О. В. Колесникова, В. Е. Лелюхин // Научно-технологические технологии в машиностроении. – 2015. – № 4.
5. Колесникова, О. В. Алгоритм определения последовательности изготовления элементов изделия «Опадающие листья» / О. В. Колесникова, В. Е. Лелюхин // Глобальный научный потенциал. – 2015. – № 2(47). – С. 54-58.
6. Лазарев, А. А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. – 222 с.
7. Demeulemeester Erik L., Herroelen Willy S. Project Scheduling: a Research Handbook. New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Acad. Publ., 2002. – 685 p.
8. Graham R. L., Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey // Ann. Discrete Optimization. – 1979. – V. 2. – P. 287-325.

**Гимадеев М. Р., Давыдов В. М., Никитенко А. В., Стельмаков В. А.**  
**M. R. Gimadeev, V. M. Davydov, A. V. Nikitenko, V. A. Stelmakov**

## **ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ И ФРЕЗЕРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ**

## **OBTAINING THE DESIRED ROUGHNESS PARAMETERS FOR DRILLING AND MILLING A CYLINDRICAL BORE**

**Гимадеев Михаил Радикович** – аспирант, преподаватель кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8-924-216-3139. E-mail: [jl\\_wiegott@list.ru](mailto:jl_wiegott@list.ru).

**Mr. Mikhail R. Gimadeev** – postgraduate student, teacher of Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-924-216-3139. E-mail: [jl\\_wiegott@list.ru](mailto:jl_wiegott@list.ru).

**Давыдов Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8(4212)37-52-59. E-mail: [davellut@mail.ru](mailto:davellut@mail.ru).

**Mr. Vladimir M. Davydov** – Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8(4212)-37-52-59. E-mail: [davellut@mail.ru](mailto:davellut@mail.ru).

**Никитенко Александр Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8-924-216-6228. E-mail: [a.v.nikitenko@mail.ru](mailto:a.v.nikitenko@mail.ru).

**Mr. Alexander V. Nikitenko** – Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Technological computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-924-216-6228. E-mail: [a.v.nikitenko@mail.ru](mailto:a.v.nikitenko@mail.ru).

**Стельмаков Вадим Александрович** – аспирант, преподаватель кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел. 8-909-851-6507. E-mail: [stelmakov\\_92@mail.ru](mailto:stelmakov_92@mail.ru).

**Mr. Vadim A. Stelmakov** – postgraduate student, teacher of Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-909-851-6507. E-mail: [stelmakov\\_92@mail.ru](mailto:stelmakov_92@mail.ru).

**Аннотация.** В работе рассматриваются методы сверления и фрезерования и их влияние на параметры шероховатости цилиндрических отверстий, полученных на обрабатывающих центрах с ЧПУ. Проведен анализ профилограмм поверхностей и влияние различных геометрических параметров шероховатости на эксплуатационные характеристики. Сформулированы рекомендации по выбору металлорежущего инструмента и подбора оптимальных режимов резания при сверлении и фрезеровании.

**Summary.** The paper discusses methods of drilling and milling, and their influence on the roughness of cylindrical holes obtained in CNC machining centers. The surface profilograms analysis and the analysis of influence of different geometric roughness parameters on performance are fulfilled. Recommendations on the choice of cutting tools and the selection of the ideal cutting conditions for drilling and milling are given.

**Ключевые слова:** обрабатывающий центр, шероховатость, сверление, фрезерование.

**Key words:** machining center, roughness, drilling, milling.

УДК 621.91

В современном машиностроении значительную долю при изготовлении корпусных деталей на обрабатывающих центрах с числовым программным управлением (ЧПУ) составляет обработка отверстий. Отверстия служат направляющими, базовыми поверхностями для установки валов, осей, подшипников и др. Для обработки точного отверстия используется до пяти различных инструментов [6; 9], а при обработке групп различных отверстий их количество значительно возрастает.

В работах [2; 10] отмечается, что существенное влияние на износостойкость пар трения влияют следующие параметры шероховатости:  $R_a$  – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины, мкм;  $R_{pk}$  – усредненная высота выступов, определяющая износ, мкм;  $R_k$  – глубина неровностей профиля поверхности, определяющая основу профиля, мкм;  $R_{vk}$  – усредненная глубина профиля, определяющая смазывающую способность поверхности и усталостное разрушение, мкм;  $R_p$  – расстояние от средней линии до высшей точки профиля в пределах базовой длины, мкм;  $R_{sk}$  – асимметрия оцениваемого профиля, мкм;  $R_{sm}$  – средняя ширины элементов профиля, мкм;  $R_q$  – среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля, мкм;  $R_c$  – среднее значение высоты элемента профиля, мкм;  $R_{ku}$  – эксцесс оцениваемого профиля, мкм;  $R_t = R_p + R_v$ ,  $R_t$  – сумма наибольшей высоты пика профиля ( $R_p$ ) и наибольшей глубины впадины профиля ( $R_v$ ) в пределах длины оценки, мкм [1].

Точность диаметрального размера отверстий обычно находится в пределах 6-9 квалитетов точности, а поверхность отверстий регламентируется по параметру шероховатости  $R_a$  0,25-6,3 мкм. Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей обработанной поверхности с относительно малыми шагами [5]. С 1 января 2016 г. вступил в силу ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности», в котором регламентируется большее количество параметров рельефа (как у зарубежных представителей) по сравнению с ГОСТ 2789-73. Практически не имеется рекомендаций по выбору метода механообработки для достижения заданных параметров шероховатости.

Эффективность процессов обработки в значительной степени зависит от методов обработки и соответствующих режимов резания, обеспечивающих необходимое качество с наибольшей производительностью.

Целью работы является разработка рекомендаций по выбору металлорежущего инструмента и подбора оптимальных режимов резания при сверлении и фрезеровании для обеспечения заданных параметров шероховатости цилиндрических отверстий.

В работе поставлены следующие задачи:

- 1) исследование параметров шероховатости при методах сверления и фрезерования отверстий;
- 2) разработка рекомендаций для получения заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании.

Исследование параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании проводилось в лаборатории CAD/CAM технологий (01бл) кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» «Тихоокеанского государственного университета» на обрабатывающем центре DMC 635 ecoline под управляющей системой Heidenhain TNC620.

Типовые технологические процессы обработки точных отверстий состоят из нескольких этапов, выполняемых в определенной последовательности [4].

Методы обработки отверстий (допуск межосевого расстояния 0,05 мм):

- 1) центрование, сверление, растачивание, развертывание предварительное и окончательное [9];
- 2) центрование, сверление, зенкерование, развертывание предварительное и окончательное [6];
- 3) сверление (сверло  $\varnothing 12$  ГОСТ 4010-77);
- 4) центрование, сверление (зенковка ГОСТ 4952-72; сверло  $\varnothing 12$  ГОСТ 4010-77);
- 5) сверление (сверло Sandvik  $\varnothing 12$  DIN 1899);
- 6) центрование, сверление (зенковка ГОСТ 4952-72; сверло Sandvik  $\varnothing 12$  DIN 1899);
- 7) фрезерование по уровням (концевая цилиндрическая двузубая фреза DIN 6528);
- 8) фрезерование по спирали (концевая цилиндрическая двузубая фреза DIN 6528).

В данной работе рассмотрены методы 3-8. Измерения полученной шероховатости проводились после окончательной механообработки на профилометре Surfcom 1800D (см. рис. 1) в метрологической лаборатории для высокоточных измерений имени почетного доктора «ТОГУ» Хидео Охцубо кафедры «Технологическая информатика и информационные системы».



Рис. 1. Профилометр SURFCOM 1800D

На рис. 2 приведены графики параметров шероховатости Ra и Rz при различных методах обработки.

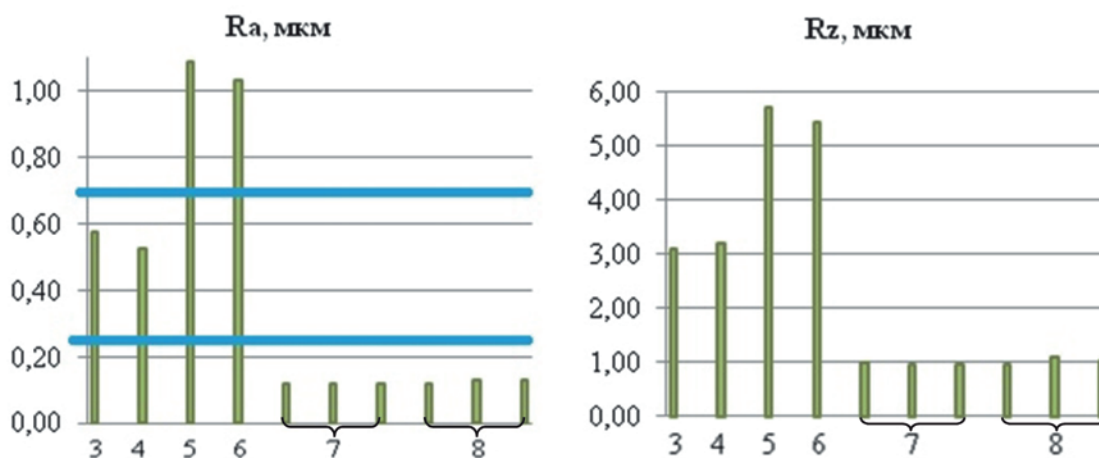


Рис. 2. Параметр шероховатости Ra и Rz при различных методах обработки

Из рис. 2 видно, что в случаях обработки методами 3, 4, 5, 6 параметр  $R_a$  находится в пределах от 0,55 до 1,25, т. е. имеется необходимость в дополнительных этапах механообработки. В работах А.П. Филина [7] описывается, что при уменьшении шероховатости по параметру  $R_a$  с 0,74 до 0,22, в среднем увеличивается предел выносливости на 14 %, а срок службы увеличивается в 3 раза. Примером таких поверхностей могут служить поверхности деталей, работающих на трение, от износа которых зависит точность работы механизма.

К эксплуатационным характеристикам поверхностей отверстий предъявляются различные требования в зависимости от служебного назначения: герметичность, износостойкость, смазывающая способность и др. Эффективным средством контроля указанных свойств является микрорельеф поверхности – шероховатость.

Традиционно контролируемые параметры шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$  не дают полной оценки эксплуатационных свойств деталей машин, особенно для прецизионного машиностроения, т.к. не оценивают общей картины формы микрорельефа. Например: при равных параметрах  $R_a$  и  $R_z$  быстрому износу подвержены вершины, т.е. произойдет быстрый износ поверхности (см. рис. 3, а), впадины влияют на разрушение сегмента поверхности, т.к. являются концентраторами напряжений (см. рис. 3, б). На износ поверхности в значительной степени влияют различные геометрические параметры шероховатости (см. рис. 3, в).

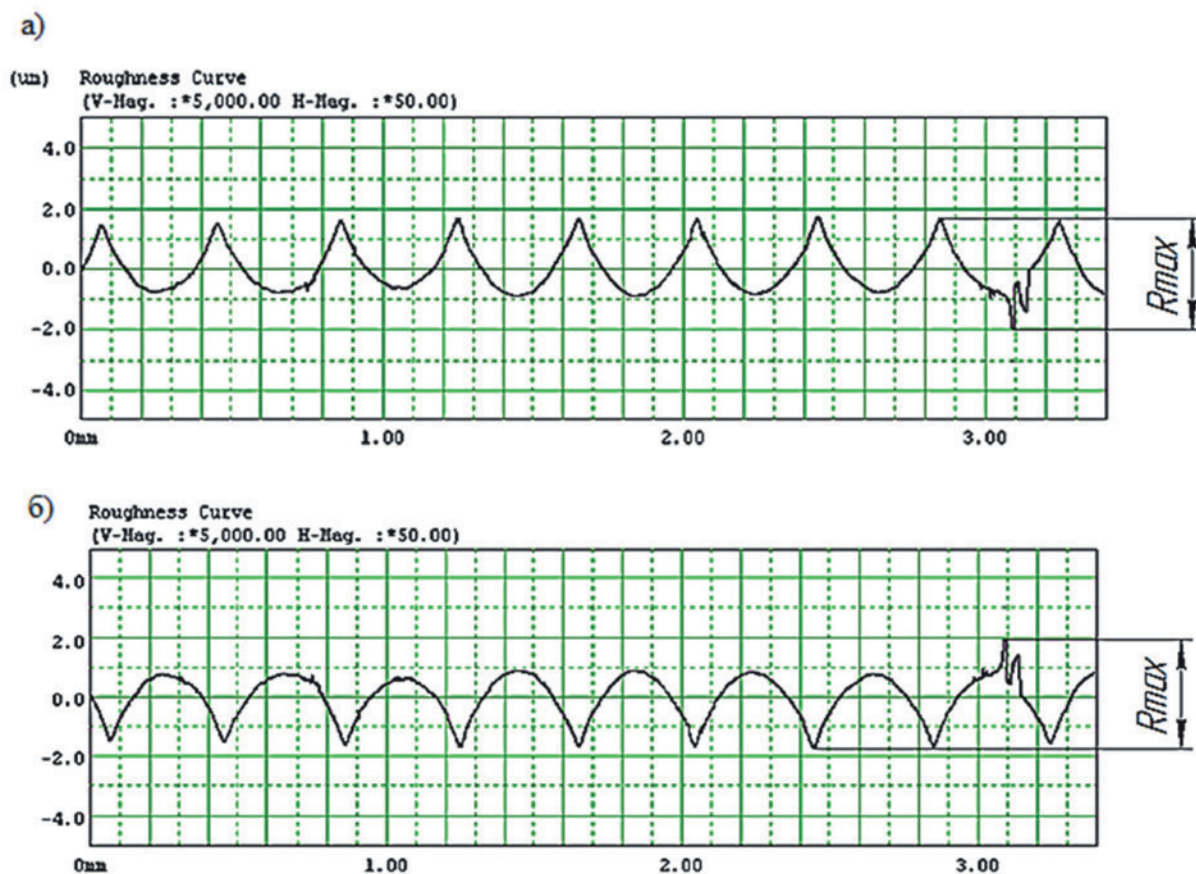


Рис. 3. Профилограммы условных поверхностей:  
 $R_{\text{max}}$  – максимальная высота микронеровностей  
(начало)

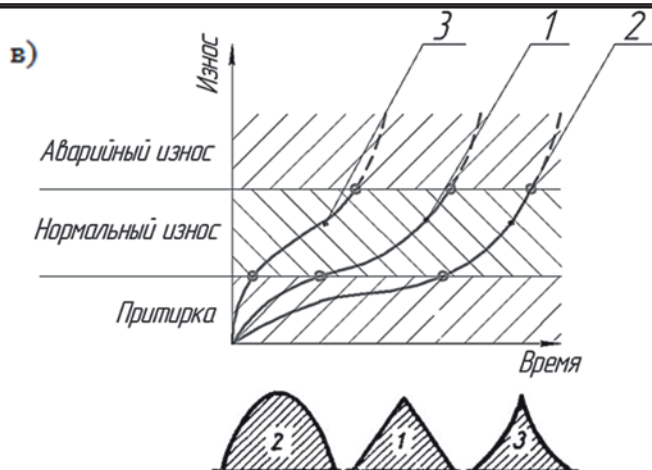


Рис. 3 (окончание)

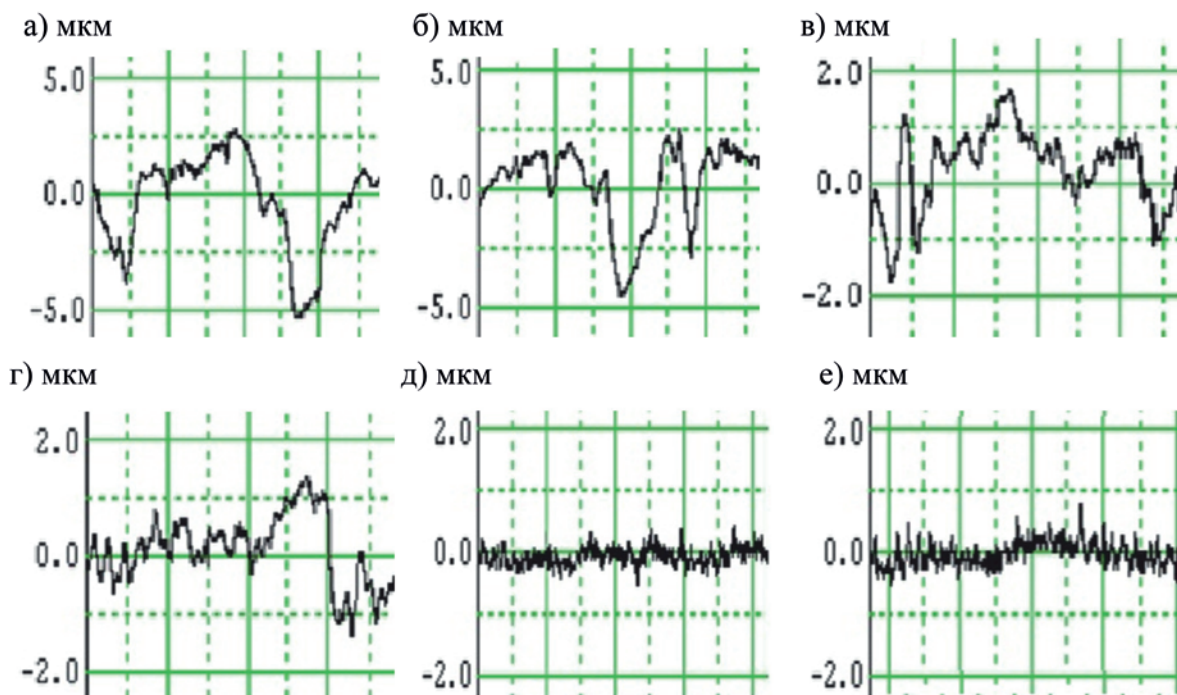


Рис. 4. Профиллограммы поверхностей, полученных различными методами механической обработки: а – сверление ГОСТ 4010-77; б – центрование и сверление ГОСТ 4010-77; в – сверление DIN 1899; г – центрование и сверление DIN 1899; д – фрезерование по уровням DIN 6528; е – фрезерование по спирали DIN 6528

Из анализа полученных профиллограмм можно заключить, что при фрезеровании износостойкость поверхности выше, чем при сверлении. Это обусловлено процессом трения наружного слоя детали, который подвергается сильному износу, вследствие чего при контактом трении выступы профиля быстро «стираются», впадины удерживают определенное количество смазки, но при этом обладают усталостной прочностью, но не во всех случаях при минимальных параметрах шероховатости поверхность является наиболее износоустойчивой, так как удержание смазки на поверхности деталей при различных условиях трения (нагрузка, скорость, материал сопрягаемых деталей и

др.) будет различным. Поэтому с учетом конкретных условий трения устанавливают оптимальную шероховатость поверхности.

В табл. 1 приведены полученные параметры шероховатости при различных методах обработки.

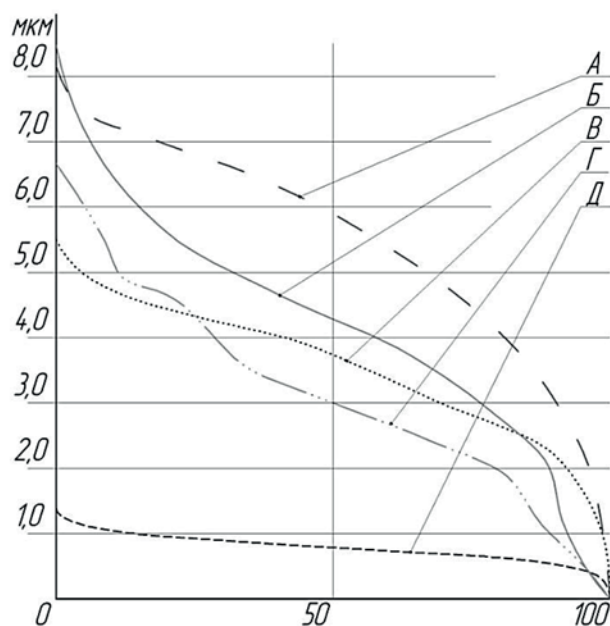
Таблица 1

Параметры шероховатости при различных методах обработки

Метод обработки	Параметр шероховатости, мкм										
	Ra	Rk	Rpk	Rvk	Rp	Rc	Rq	Rsk	Rku	Rt	Rsm
Сверление (Сверло $\phi$ 12, ГОСТ 4010-77)	1,02- 1,11	2,87- 3,40	0,32- 0,76	1,25- 2,15	2,07- 2,50	3,43- 3,99	1,23- 1,37	-0,55- -0,09	2,58- 2,98	6,90- 8,08	206,48- 271,55
Центрование, сверление (Зенковка ГОСТ 4952-72; Сверло $\phi$ 12, ГОСТ 4010-77)	0,67- 1,39	1,88- 3,28	0,43- 0,77	1,14- 2,90	1,53- 2,90	2,37- 4,72	0,83- 1,69	-0,72- -0,39	2,53- 3,20	4,70- 8,42	164,09- 205,18
Сверление (Сверло, $\phi$ 12мм, Sandvik DIN 1899)	0,49- 0,56	1,58- 2,18	0,52- 1,13	0,45- 0,53	1,46- 1,71	1,87- 2,20	0,59- 0,70	-0,04- 0,37	2,25- 2,70	3,42- 4,82	117,36- 245,62
Центрование, сверление (Зенковка ГОСТ 4952-72; Сверло $\phi$ 12, Sandvik DIN 1899)	0,44- 0,65	1,46- 1,75	0,54- 1,38	0,26- 1,01	1,50- 2,02	1,80- 2,69	0,54- 0,84	-0,22- 0,35	2,48- 3,19	3,78- 7,48	167,47- 203,82
Фрезерование (Концевая цилиндрическая двузубая фреза $\phi$ 10мм, Sandvik DIN 6528)	0,11- 0,25	0,38- -0,44	0,13- 0,24	0,12- 0,18	0,51- 0,63	0,47- 0,53	0,15- 0,16	0,21- 0,35	3,20- 3,48	1,15- 1,31	32,85- 41,59

Полученные данные сведены в график кривых Аббота-Файрстоуна (кривые коэффициента смятия профиля) для более детального анализа эксплуатационной характеристики поверхностей отверстий (см. рис. 5). Данные кривые можно интерпретировать как функцию интегральной вероятности ординат образцов в пределах базовой длины.

Рис. 5. Кривые Аббота-Файрстоуна при различных методах обработки:  
 а – сверление (сверло  $\phi$  12 ГОСТ 4010-77); б – центрование, сверление (зенковка ГОСТ 4952-72; сверло  $\phi$  12 ГОСТ 4010-77);  
 в – сверление (сверло Sandvik  $\phi$  12 DIN 1899); г – центрование, сверление (зенковка ГОСТ 4952-72; сверло Sandvik  $\phi$  12 DIN 1899);  
 д – фрезерование (концевая цилиндрическая двузубая фреза DIN 6528)



На рис. 5 изображены кривые Аббота-Файрстоуна. Процесс приработки поверхностей, полученных методами А, Б, В, Г, на первых этапах характеризуется разогревом и износом выступов шероховатости микрорельефа. Далее температура уменьшается и достигает постоянного значения, шероховатость стабилизируется, что соответствует падению коэффициента трения. Назначение оптимальных параметров микрорельефа позволяет уменьшить износ в период приработки в 2-5 раз [10].

### Вывод

В данной работе были разработаны рекомендации по выбору металлорежущего инструмента и подбора оптимальных режимов резания при сверлении и фрезеровании. Для обеспечения параметров шероховатости  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_c$  и  $R_t$  может использоваться метод фрезерования по уровням или по спирали.

При методе сверления средняя ширина элементов профиля  $R_{sm}$  в 5 раз больше, чем при фрезеровании, но анализ кривых Аббота-Файрстоуна показывает, что опорная поверхность по параметрам  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$  наиболее износоустойчива при фрезеровании. Анализ параметров  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_c$  и  $R_t$  показывает, что наименьшее количество пиков профиля поверхности получается при методе фрезерования по спирали с подачей 0,07 мм/зуб, эти факторы влияют на сокращение время приработки поверхностей (в среднем на 14 %).

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – 2016.
2. Гимадеев, М. Р. Исследование влияние методов формообразования при фрезеровании поверхности на параметры микрорельефа / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. – Хабаровск, 2015. – 535 с.
3. Давыдов, В. М. Формирование технических характеристик мехатронного модуля механической обработки на стадии концептуального проектирования / В. М. Давыдов // СТИН. – 2005. – № 7.
4. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин, Я. А. Музыкант, А. И. Мещеряков [и др.]. – Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Козачук, А. М. Метрологические особенности определения параметров качества поверхности: автореф. ... магистра техники и технологии / Козачук А. М. – Хабаровск. – 2009.
6. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм [и др.]; под общ. ред. А. А. Панова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.
7. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 3 / А. П. Филин. – 1981. – 480 с.
8. Андрианов, А. И. Прогрессивные методы технологии машиностроения / А. И. Андрианов. – М.: Машиностроение, 1975. – 238 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2002. – 694 с.
10. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

**Стельмаков В. А., Давыдов В. М., Никитенко А. В., Гимадеев М. Р.**  
**V. A. Stelmakov, V. M. Davydov, A. V. Nikitenko, M. R. Gimadeev**

**МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ГЛАДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ  
ПО ДИАМЕТРАЛЬНОМУ РАЗМЕРУ И ОТНОСИТЕЛЬНОМУ ПОЛОЖЕНИЮ  
ИХ ОСЕЙ**

**THE METHOD FOR EVALUATING THE ACCURACY OF SMOOTH  
CYLINDRICAL HOLES IN THE DIAMETRIC SIZE AND THEIR AXES RELATIVE  
POSITION**

**Стельмаков Вадим Александрович** – аспирант, преподаватель кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел. 8-909-851-6507. E-mail: stelmakov\_92@mail.ru.

**Mr. Vadim A. Stelmakov** – postgraduate student, teacher of Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-909-851-6507. E-mail: stelmakov\_92@mail.ru.

**Давыдов Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8(4212)37-52-59. E-mail: davellut@mail.ru.

**Mr. Vladimir M. Davydov** – Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8(4212)-37-52-59. E-mail: davellut@mail.ru.

**Никитенко Александр Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8-924-216-6228. E-mail: a.v.nikitenko@mail.ru.

**Mr. Alexander V. Nikitenko** – Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Technological computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-924-216-6228. E-mail: a.v.nikitenko@mail.ru.

**Гимадеев Михаил Радикович** – аспирант, преподаватель кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск), тел.: 8-924-216-3139. E-mail: jl\_wiegott@list.ru.

**Mr. Mikhail R. Gimadeev** – postgraduate student, teacher of Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk), n.p.: 8-924-216-3139. E-mail: jl\_wiegott@list.ru.

**Аннотация.** В данной работе предложен метод оценки точности гладких цилиндрических отверстий по диаметальному размеру на всей длине (по длине образующей), который позволяет наиболее точно определить межосевое положение осей отверстий при помощи современных измерительных устройств и возможностей обрабатывающих центров с числовым программным управлением. Сформулированы выводы о преимуществах данного метода и проведены сравнения способов и стратегий обработки по параметру точности диаметрального размера и относительного положения осей отверстий.

**Summary.** In this paper we propose a method for assessing the accuracy of smooth cylindrical holes in diametric size over the entire length. That is the most accurate method to determine the position of the axes with the help of modern measuring devices and capabilities for machining centers with computer numerical control. We draw conclusions about the advantages of this method and a comparison of the methods and treatment strategies, the accuracy of the diametric size and relative position of the axes of the holes.

**Ключевые слова:** обрабатывающий центр, диаметральный размер, относительное положение осей, измерительный щуп, стратегии обработки, метод обработки.

**Key words:** machining center, the diametric size, relative position of the axes, probe, treatment strategies, the method of processing.

УДК 621.9.04

На современном этапе развития технологий в областях машиностроения, авиастроения, судостроения все больше происходит замена традиционных методов обработки на более современные. Например, обработка точных отверстий в привычном нам виде: сверление, зенкерование, развертывание, расточка и другие заменяются фрезерованием.

Это обусловлено универсальностью метода фрезерования: он позволяет производить обработку отверстий различного диаметра, ступенчатых отверстий и, зачастую, в зависимости от требований чертежа, может заменить операцию растачивания. Однако при такой замене операций необходимо знать о точности получаемых отверстий, так как в областях авиастроения, судостроения и других это является важным, поскольку именно отверстия обеспечивают относительное положение валов, подшипников, различных узлов в механизме, что соответственно влияет на его работоспособность.

Точность является в свою очередь комплексным понятием, включающим в себя: точность размеров, точность геометрической формы и точность взаимного расположения поверхностей. Точность диаметрального размера и относительного положения оси отверстия относится к макроотклонениям и при обработке регламентируется, как правило, допусками [3; 1]. Точность диаметрального размера оценивают только в отдельно взятом сечении, однако, в связи с растущей тенденцией развития технологий в области высокоточной и высокоскоростной обработки прецизионных деталей, такие элементы, как цилиндры двигателей, автоматические коробки переключения передач и многие другие, требуют по своему служебному назначению высокоточной обработки отверстий на всей своей длине по диаметральному размеру, а также по относительному положению их осей.

Оценка точности отверстия по всей длине, а не в отдельно взятом сечении является важной задачей. Соответственно, целью данной работы является разработка метода оценки точности диаметральных размеров на всей длине отверстий, а также точности их относительного положения осей с учетом применения современных технологических систем.

Исходя из цели работы, выделены следующие задачи:

1. сформировать рекомендации по выбору способов и стратегий обработки фрезерованием для получения точных отверстий на всей длине;
2. установить зависимость величины погрешности диаметрального размера от различных стратегий и способов обработки;
3. установить зависимость величины погрешности межосевого расстояния от различных стратегий и способов обработки.

Из анализа работ [2] можно сделать вывод о том, что в сечениях отверстия ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ) наблюдаются отклонения от номинального значения диаметра ( $D_1, D_2, \dots, D_n$ ) и появляется эксцентриситет ( $e_x, e_y$ ), который характеризует положение реальной оси, отсюда следует, что реальная ось отверстия однозначно не определена в пространстве и имеет различные геометрические параметры (см. рис. 1).

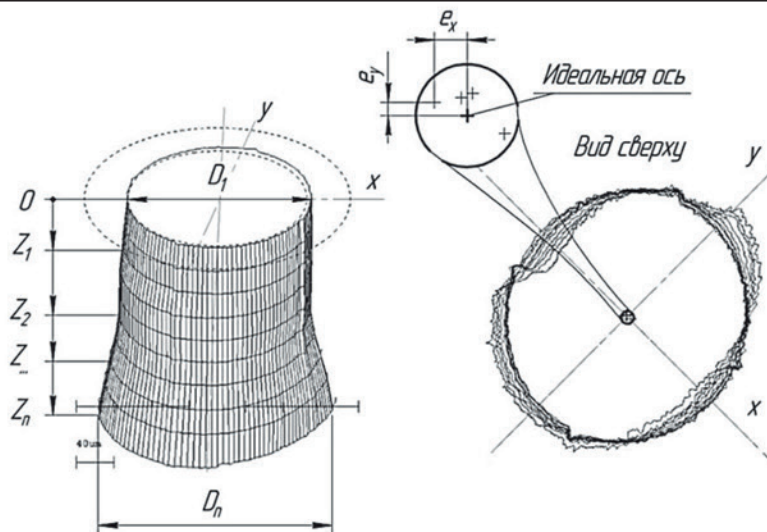


Рис. 1. Реальная форма получаемого отверстия при измерении его в разных сечениях

Для определения положения оси отверстия в пространстве используются проекции на плоскости XZ и YZ центров окружностей, получаемых в различных сечениях (см. рис. 2). Полученное множество точек позволяет построить линию тренда с характеризующим её уравнением. Данные уравнения позволяют определить координаты X и Y центра окружности при любой глубине Z.

Исходя из полученных проекций, составлена следующая пространственная картина для двух отверстий (см. рис. 3), из которой видно, что при реальных положениях осей отверстий оценка точности их относительного положения, т.е. межосевого расстояния, невозможна, так как в различных сечениях при  $Z=\text{const}$  получается различное значение межосевого расстояния  $W_x$  и  $W_y$ .

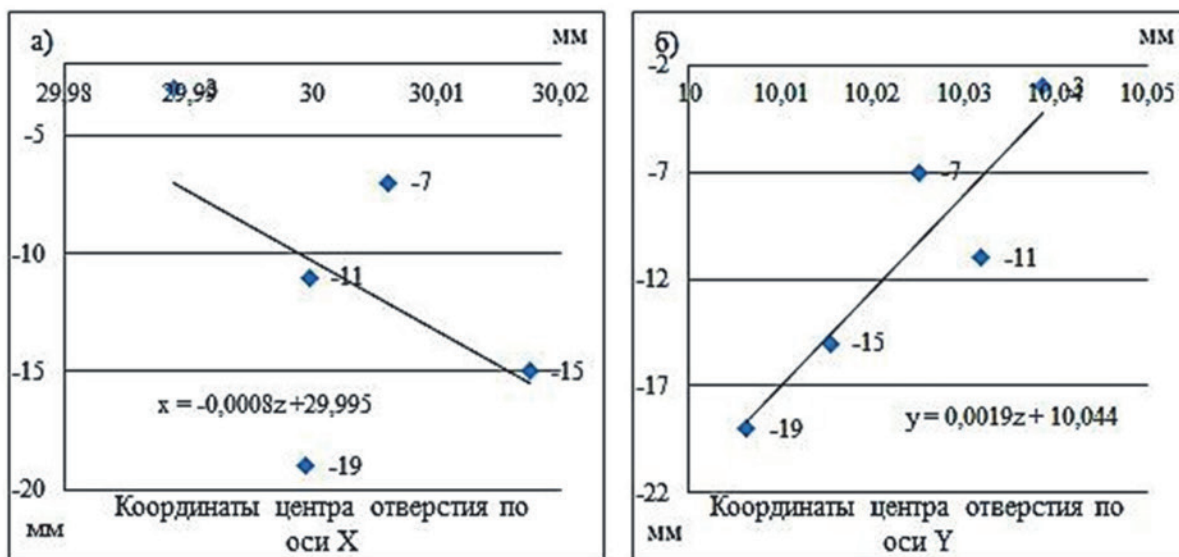


Рис. 2. Проекция центров окружностей в различных сечениях:  
 а – на плоскость XZ; б – на плоскость YZ

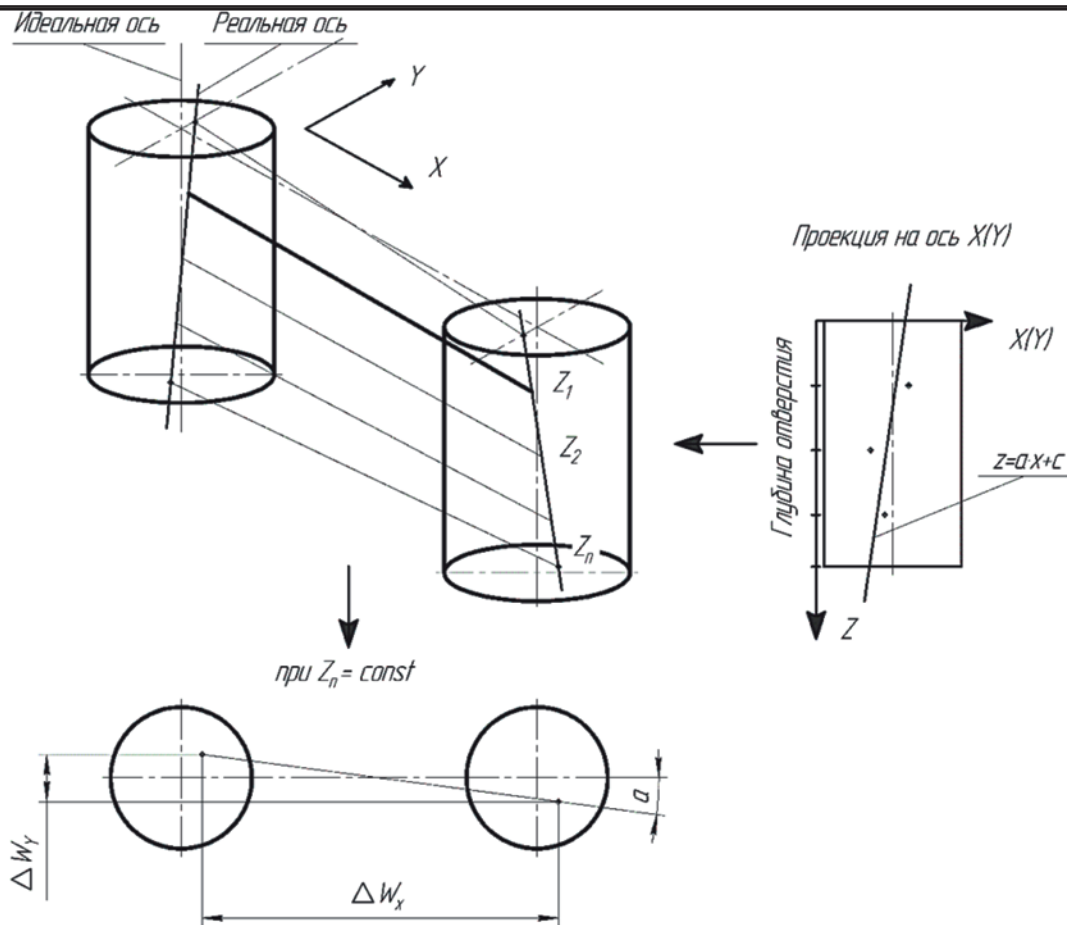


Рис. 3. Пространственная картина точности относительного положения реальных осей двух отверстий

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что для оценки межосевого расстояния необходимо иметь строго перпендикулярные оси отверстий, а для этого необходимо знать величину погрешности диаметрального размера отверстия на всей его длине. Для достижения этого проведено измерение отверстия в нескольких сечениях, причем сечения в отверстии равноудалены и выбираются в зависимости от глубины отверстия. В результате измерений получены данные о координатах центров сечений и их диаметральных размерах. На основании этих данных, используя современную САД-систему КОМПАС-3D, построены соответствующие круглограммы. Анализ результатов круглограмм показал, что окружности, центры которых достаточно смещены от идеальной оси, имеют выступающие дуги, на них выбираем наиболее удаленные три и более точки от идеальной оси и проводим через эти точки перпендикуляры до пересечения с плоскостями начала и окончания отверстия (см. рис. 4). На этих плоскостях строим окружности через точки, получившиеся от пересечения с ними перпендикуляров. Полученный при этом цилиндр, который по своему диаметру охватывает все сечения, измеренные на разных глубинах, является абсолютно идеальным и дает возможность оценить точность диаметрального размера полученного отверстия на всей его длине.

Данный метод определения точности отверстия на всей его длине можно осуществлять на координатно-измерительных машинах и современном станочном оборудовании с использованием циклов измерительного щупа.

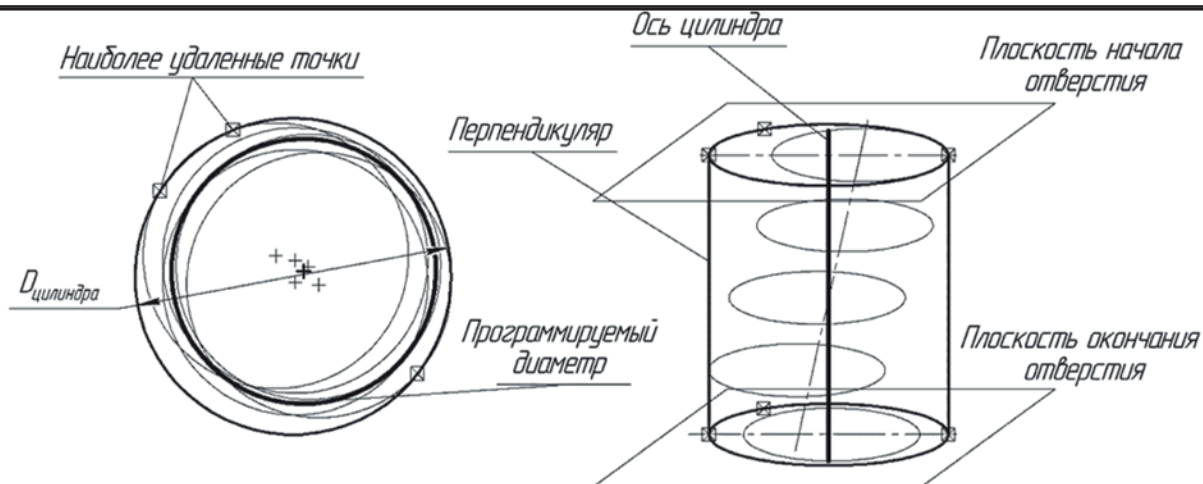


Рис. 4. Плоская и пространственная круглограммы

Так как полученный цилиндр является идеальным, то и его ось перпендикулярна его верхним и нижним плоскостям. Руководствуясь вышеописанным порядком действий, можно оценить точность межосевого расстояния двух и более отверстий.

Для выполнения поставленных задач в рамках проводимого исследования была изготовлена пластина с тридцатью отверстиями, полученными разными способами и стратегиями обработки; технологические параметры представлены в табл. 1. Отверстия были разбиты на пять сечений, измерения производились на обрабатывающем центре с ЧПУ DMU 635 ecoline при помощи измерительного щупа фирмы HEIDENHAIN, данное измерительное устройство калибруется при помощи образцовых мер и дает точность измерений  $\pm 1$  мкм.

Таблица 1

Планирование эксперимента

Переход	Количество отверстий	Подача, мм/зуб	Подача, мм/обр
1 Сверление российским сверлом	3	–	0,15
2 Сверление российским сверлом с центровкой	3	–	0,15
3 Сверление сверлом фирмы Sandvik	3	–	0,15
4 Сверление сверлом фирмы Sandvik с центровкой	3	–	0,15
5 Чистовое фрезерование по уровням резания	3	0,04	–
6 Чистовое фрезерование по уровням резания	3	0,07	–
7 Чистовое фрезерование по уровням резания	3	0,1	–
8 Чистовое фрезерование по спирали	3	0,04	–
9 Чистовое фрезерование по спирали	3	0,07	–
10 Чистовое фрезерование по спирали	3	0,1	–

Обработка проводилась двузубой фрезой диаметром 10 мм по DIN 6528 фирмы Sandik Corommand и двумя сверлами: одно диаметром 12 мм по ГОСТ 4010-77, другое – фирмы Sandik Corommand диаметром 12 мм по DIN1899.

Для проведения чистовой обработки фрезерованием в алюминиевой заготовке предварительно были просверлены отверстия диаметром 12 мм на глубину 20 мм. Чистовое фрезерование проводилось на диаметр 12,4 мм, припуск на сторону составил 0,2 мм.

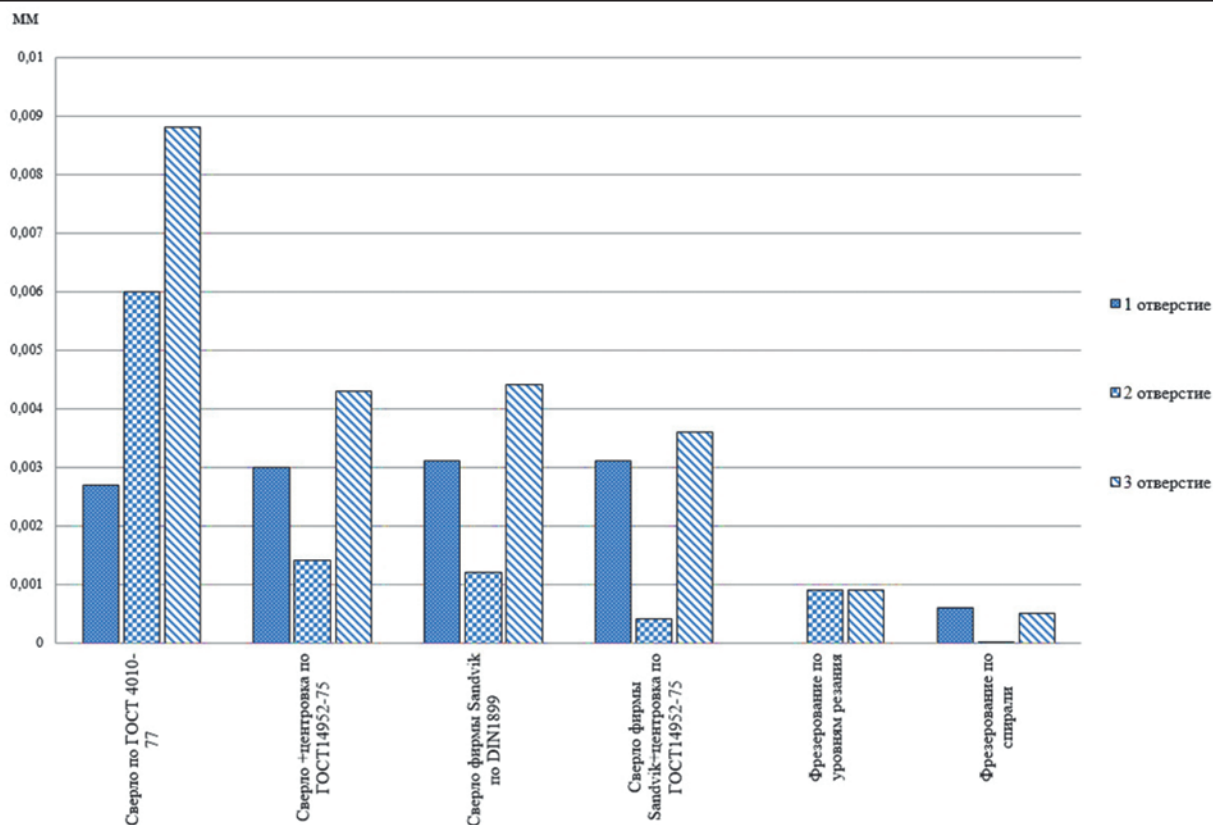


Рис. 5. Зависимость погрешности диаметрального размера отверстий от способов и стратегий обработки

Анализ результатов (см. рис. 5 и табл. 2) получившихся значений погрешностей диаметральных размеров при разных стратегиях и способах обработки отверстия показывает, что наиболее высокими значениями погрешности характеризуются отверстия, полученные сверлом по ГОСТ 4010-77 (Н15–Н16), а наиболее низкими – фрезерованием по спирали (Н7–Н8).

Таблица 2

Результаты измерений диаметральных размеров

	1 отверстие	2 отверстие	3 отверстие	Квалитет цилиндра	Среднее значение квалитета отдельного сечения
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Сверло по ГОСТ 4010-77					
D цилиндра, мм	12,683	12,660	12,724	Н15–Н16	Н13
Погрешность, мм	0,683	0,660	0,724		
Сверло с центровкой по ГОСТ 4952-72					
D цилиндра, мм	12,508	12,589	12,599	Н15	Н13
Погрешность, мм	0,508	0,589	0,599		

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
Сверло Sandvik по DIN1899					
Д цилиндра, мм	12,071	12,059	12,075	H10	H8
Погрешность, мм	0,071	0,059	0,075		
Сверло Sandvik с центровкой по ГОСТ 4952-72					
Д цилиндра, мм	12,063	12,077	12,059	H10	H8
Погрешность, мм	0,063	0,077	0,059		
Фрезерование по уровням резания F=0,04 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,451	12,452	12,429	H9-H10	H9
Погрешность, мм	0,051	0,052	0,029		
Фрезерование по уровням резания F=0,07 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,435	12,428	12,425	H8-H9	H10
Погрешность, мм	0,035	0,028	0,025		
Фрезерование по уровням резания F = 0,1 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,443	12,441	12,460	H9-H10	H10
Погрешность, мм	0,043	0,041	0,060		
Фрезерование по спирали F = 0,04 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,415	12,412	12,417	H7-H8	H5-H6
Погрешность, мм	0,015	0,012	0,017		
Фрезерование по спирали F = 0,07 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,45	12,432	12,429	H8-H9	H7-H8
Погрешность, мм	0,05	0,032	0,029		
Фрезерование по спирали F = 0,1 мм/зуб					
Д цилиндра, мм	12,429	12,429	12,433	H8-H9	H8
Погрешность, мм	0,029	0,029	0,033		

Также из табл. 2 видно, что с увеличением подачи при фрезеровании по уровням резания (квадратные маркеры) и по спирали (треугольные маркеры) погрешность диаметрального размера увеличивается (см. рис. 6).

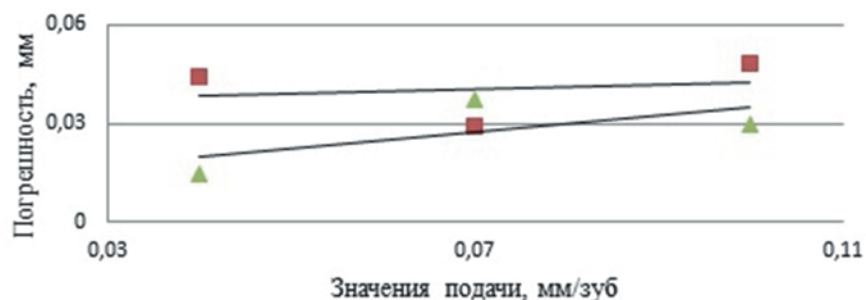


Рис. 6. Зависимость погрешности диаметрального размера от значения подачи при различных стратегиях обработки

Для получения пространственной картины о точности относительного положения отверстий рассмотрены результаты, полученные при анализе межосевого расстояния (см. табл. 3 и рис. 7).

Таблица 3

Результаты измерений межосевого расстояния

1 отверстие D цилиндра, мм	2 отверстие D цилиндра, мм	3 отверстие D цилиндра, мм	Межосевое расстояние между 1 и 2 отверстиями, мм	Межосевое расстояние между 2 и 3 отверстиями, мм	Межосевое расстояние между 1 и 3 отверстиями, мм
Сверло ГОСТ 4010-77					
12,683	12,660	12,724	19,997	19,994	39,991
Погрешность			0,003	0,006	0,009
Сверло с центровкой по ГОСТ 4952-72					
12,508	12,589	12,599	19,997	19,998	39,995
Погрешность			0,003	0,002	0,005
Сверло Sandvik по DIN1899					
12,071	12,059	12,075	19,997	19,998	39,995
Погрешность			0,003	0,002	0,005
Сверло Sandvik с центровкой по ГОСТ 4952-72					
12,063	12,077	12,059	19,997	19,999	39,996
Погрешность			0,003	0,001	0,004
Фрезерование по уровням резания F = 0,04 мм/зуб					
12,451	12,452	12,429	19,998	19,999	39,997
Погрешность			0,002	0,001	0,003
Фрезерование по уровням резания F = 0,07 мм/зуб					
12,435	12,428	12,425	20,000	19,999	39,999
Погрешность			0,000	0,001	0,0001
Фрезерование по уровням резания F = 0,1 мм/зуб					
12,443	12,441	12,460	19,998	20,002	40,000
Погрешность			0,002	-0,002	0,000
Фрезерование по спирали F = 0,04 мм/зуб					
12,415	12,412	12,417	19,999	19,999	39,999
Погрешность			0,0001	0,0001	0,0001
Фрезерование по спирали F = 0,07 мм/зуб					
12,450	12,432	12,429	20,000	19,999	40,000
Погрешность			0,000	0,001	0,000
Фрезерование по спирали F = 0,1 мм/зуб					
12,429	12,429	12,433	19,999	19,999	39,999
Погрешность			0,001	0,001	0,0001

Из рис. 7 видно, что наиболее высокими значениями погрешности характеризуются отверстия, полученные сверлом по ГОСТ 4010-77, а наиболее низкими – фрезерованием по спирали и по уровням резания.

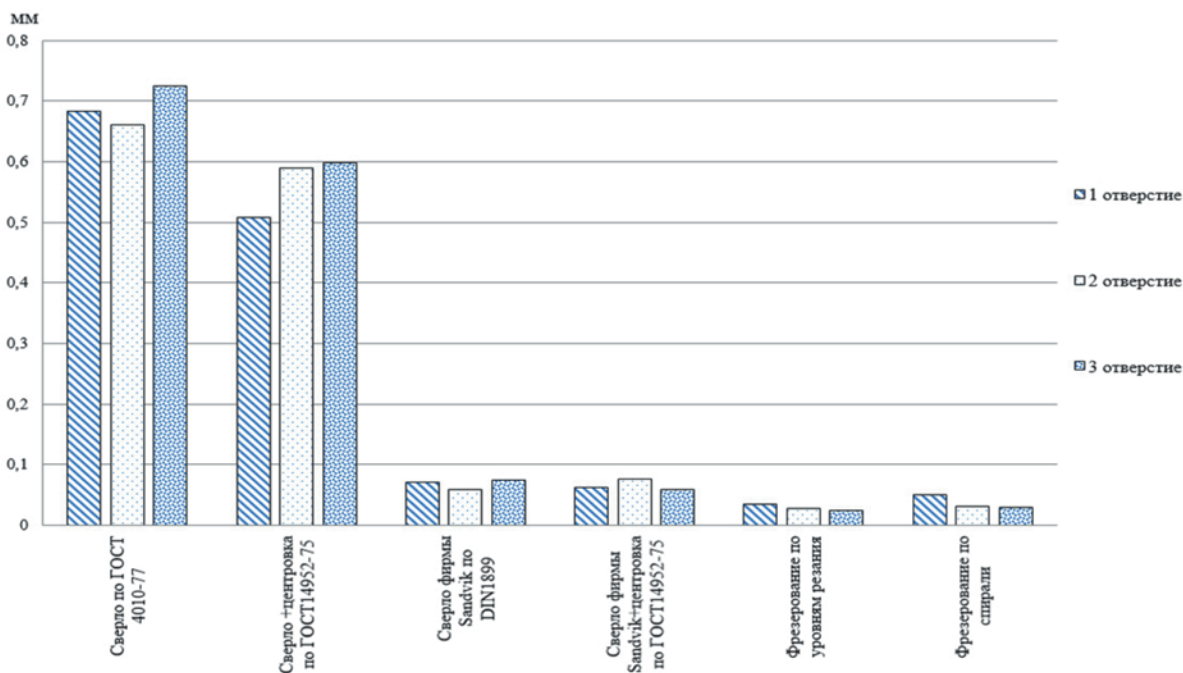


Рис. 7. Зависимость погрешности межосевого расстояния от способов и стратегий обработки

Таким образом, проанализировав полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Предложен метод оценки точности диаметральных размеров на всей длине отверстий, который позволяет наиболее точно определить относительное положение осей отверстий.

2. Установлена зависимость значения погрешности диаметрального размера и значения погрешности межосевого расстояния от различных стратегий и способов обработки. Наиболее эффективным и точным является фрезерование по спирали и фрезерование по уровням резания. В ходе обработки фрезерованием по спирали получена точность отверстия по всей длине Н7–Н8.

3. Точность диаметрального размера на всей длине при чистовой обработке отверстий методами фрезерования по уровням резания и по спирали напрямую зависит от подачи, т.е. с увеличением подачи увеличивается значение погрешности на 5-25 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов, С. Л. Моделирование процесса фрезерования отверстий на станках с ЧПУ / С. Л. Леонов, А. Б. Белов // Ползуновский вестник. – 2012.
2. Стельмаков, В. А. Исследование причин возникновения погрешностей формы при обработке отверстий фрезерованием / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы». – Комсомольск-на-Амуре, 2015.
3. Штриплинг, Л. О. Применение высокоскоростного фрезерования точных отверстий для совершенствования технологии производства корпусных деталей из алюминия / Л. О. Штриплинг, М. Г. Попов // Омский научный вестник. – 2010. – № 3-93.



**Мокрицкий Б. Я., Верещагина А. С., Верещагин В. Ю.**  
**B. Ya. Mokritskii, A. S. Vereshchagina, V. Y. Vereshchagin**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ**

## **MODELING STRESS AND DEFORMATION OF SOLID CARBIDE END MILLS**

**Мокрицкий Борис Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

**Mr. Boris Ya. Mokritskii** – Doctor of Engineering, Professor, Department of mechanical engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: boris@knastu.ru.

**Верещагина Александра Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa321@gmail.com.

**Ms. Alexandra S. Vereshchagina** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa321@gmail.com.

**Верещагин Владислав Юрьевич** – старший преподаватель кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Klirickv@gmail.com.

**Mr. Vladislav Y. Vereshchagin** – Senior Lecturer, Information Security, Information Systems and Physics Department, Amur Humanitarian and Pedagogical State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Klirickv@gmail.com.

**Аннотация.** В погоне за производительностью обработки на современных станках с ЧПУ цельные твёрдосплавные концевые фрезы вытеснили все ранее применявшиеся виды концевых фрез (из быстрорежущей инструментальной стали, с напайными твёрдосплавными пластинами, со сменными режущими пластинами, составные твёрдосплавные фрезы со стальным хвостовиком). С ростом производительности обработки возросли и затраты на инструмент, т.к. ресурс фрез стал ограничиваться не величиной износа их зубьев, а сколом хвостовика. Предложены параметры управления конструкцией фрез для регламентирования области применения цельных фрез и рекомендации по области применения составных твёрдосплавных концевых фрез.

**Summary.** In pursuit of the processing capacity on modern CNC solid carbide end mills replaced all kinds (of high speed tool steel with brazed carbide inserts, with replaceable inserts, composite carbide cutter with steel shank) end mills that were previously used. With the increasing processing capacity tool costs became greater because a resource of mills was limited not by the amount of their teeth wear, but by the shatter cleavage. Parameters of controlling mills structure to regulate solid cutters application and recommendations on the composite solid-alloyed end mills application are given.

**Ключевые слова:** область и условия применения составных и цельных твёрдосплавных концевых фрез.

**Key words:** location and conditions of composite and solid carbide end mills use.

УДК 621.914.22.025.7

*Работа выполнена при поддержке гранта № 9.251.2014/К Минобрнауки РФ.*

Согласно ГОСТ 18372-73 концевые твёрдосплавные фрезы предназначены для обработки уступов и плоскостей (фрезы нормальной точности), закрытых контуров и пазов (фре-

зы повышенной точности) и подразделяются на цельные и со стальным цилиндрическим хвостовиком [1]. Наличие зубьев на торцевой поверхности предполагает возможность кратковременной работы фрезы с осевой подачей (вдоль оси вращения фрезы). Типовым случаем является обработка зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности фрезы. Длина режущей части такой фрезы предопределяется длиной обрабатываемой поверхности, в типовом случае (для фрез диаметром 20 мм и менее) длина режущей части составляет треть или четверть общей длины фрезы.

Ранее такие фрезы изготавливали из инструментальных быстрорежущих сталей. Стремление к росту производительности привело к тому, что на цилиндрический корпус, выполненный из конструкционной стали, паяли твёрдосплавные пластины. Значительные напряжения в зоне пайки сдерживали рост режимов резания. Применение сменных режущих пластин на стальных корпусах решило проблему, но только при значительных размерах фрез, при диаметрах более 20 мм и сегодня применение сменных пластин затруднено. Применение составных фрез (режущая часть выполнена из твёрдого сплава, хвостовик – из конструкционной стали) решило проблему, но создало хлопоты, связанные с ростом номенклатуры закупок фрез. Применение составных фрез совпало с резким расширением ассортимента труднообрабатываемых материалов, для обработки которых востребовались цельные (из-за их высокой жёсткости) твёрдосплавные фрезы. Для уменьшения номенклатуры покупаемых фрез составные фрезы перестали применяться, цельные фрезы [2] стали применяться во всех условиях эксплуатации, вплоть до раскроя и снятия фаски на алюминиевых листах. В себестоимости продукции возросла доля инструментальных затрат из-за того, что отказ фрез стал происходить преимущественно в месте их крепления путём скола, т.е. работоспособность фрез стала лимитироваться не величиной износа зубьев фрезы, а низкой сопротивляемостью твёрдого сплава усталостному циклическому нагружению, приводящей к сколу хвостовика (рис. 1). Применение сменных резбовых режущих частей (см. рис. 1, з) в сборных твёрдосплавных фрезах ещё больше повысило стоимость фрез, но применение твёрдосплавных хвостовиков со специально подобранным модулем Юнга и пределом прочности сняло проблему скола хвостовика.

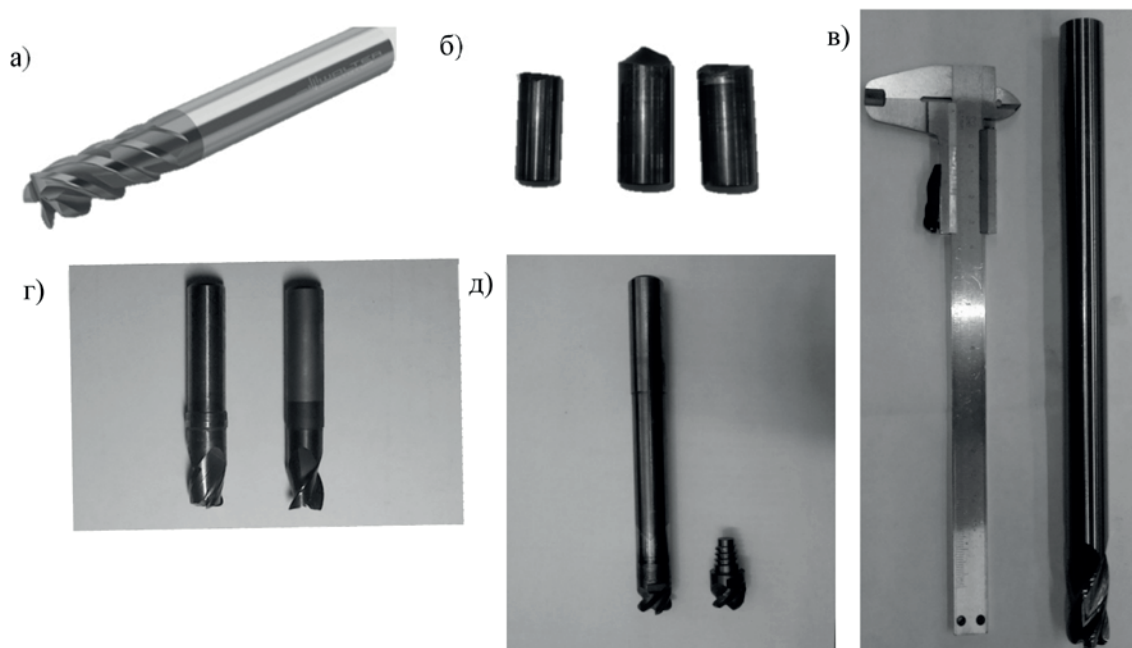


Рис. 1. Примеры исполнения твёрдосплавных концевых фрез:  
а – типовая фреза фирмы Walter; б – сколы хвостовика фрез; в – фреза длиной 245 мм при диаметре 16 мм; г – сборная твёрдосплавная фреза со сменной рабочей частью фирмы Sandvik Coromant; д – разработанные составные фрезы

В данной ситуации очевидна необходимость возврата к применению составных твердосплавных концевых фрез, но с обеспечением возможности управления областью их применения за счёт современных средств оптимизации конструкции составных фрез.

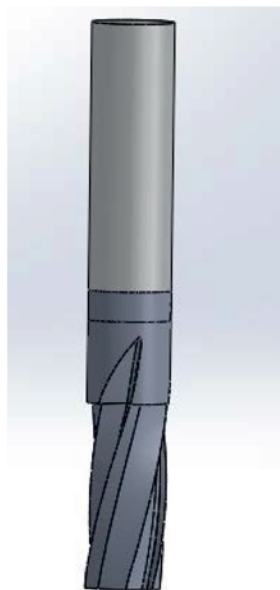


Рис. 2. Электронная модель составной фрезы

### Материалы и методика эксперимента

В данной работе приведены некоторые результаты численного моделирования полей напряжений и величин деформации стержня составной концевой фрезы.

Методика виртуального эксперимента ориентирована на формирование расчетной модели фрезерной обработки деталей сложной геометрии на станках с ЧПУ для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) режущего инструмента, в частности торцевых (сплошных или составных) фрез. В качестве среды виртуального моделирования использована САЕ-система SolidWorks 2016, а моделирование НДС и деформаций фрезы в процессе обработки заготовки детали моделировалось с использованием пакета Simulation, включенным в SolidWorks. Пространственная 3D-модель фрезы, выполненная согласно источнику [1], показана на рис. 2.

Геометрические параметры модели фрезы и физико-механические свойства материала инструмента представлены в табл. 1.

Численное моделирование осуществлено с применением типовой программы для расчётов полей напряжений и величин деформаций методом конечных элементов (рис. 3, а). Рассматриваемые модели схемы деформации корпуса фрезы приведены на рис. 3, б.

### Результаты и их обсуждение

Исследование сил резания при типовых и форсированных режимах резания показало, что нормальная составляющая силы резания не превышает 3000 Н. Введение этой величины в исходные данные расчёта методом конечных элементов показало, что для диаметра 16 мм при длине  $l_k$  консольной части от 70 до 100 мм как цельной, так и составной фрезы их отклонения (величина деформации) сопоставимы и укладываются в требования точности, предъявляемые к пазовым (шпоночным) поверхностям.

Таблица 1

Геометрические параметры модели фрезы и физико-механические свойства материала инструмента

Геометрические параметры модели фрезы	Физико-механические свойства материала инструмента: фреза цельная (BK8), фреза составная (BK8+P18)
– фреза концевая диаметром 14 мм; – длина режущей части – 45 мм; – длина хвостовика – 45 мм; – угол наклона винтовой канавки – 35°; – главный угол в плане – 90°	Материал BK8
	– модуль упругости – 520 000 Н/мм <sup>2</sup> ; – массовая плотность – 14,8 г/см <sup>3</sup> ; – коэффициент Пуассона – 0,2; – модуль сдвига – 170 000 Н/мм <sup>2</sup> ; – предел прочности при сжатии – 5000 Н/мм <sup>2</sup>
	Материал P18
	– модуль упругости – 250 000 Н/мм <sup>2</sup> ; – массовая плотность – 8,8 г/см <sup>3</sup> ; – коэффициент Пуассона – 0,25; – модуль сдвига – 83 000 Н/мм <sup>2</sup> ; – предел прочности при сжатии – 3820 Н/мм <sup>2</sup>

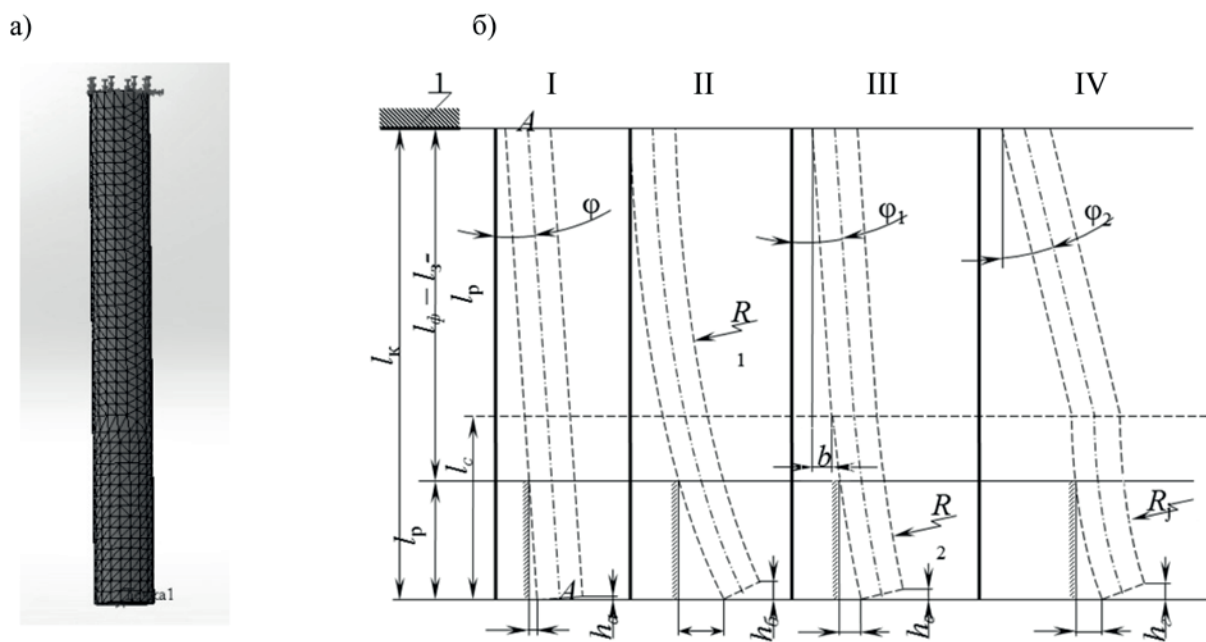


Рис. 3. Модели исследования:

а – модель стержня фрезы для расчёта методом конечных элементов; б – расчётные схемы деформации корпуса фрезы: 1 – расчётная схема деформации цилиндра тела фрезы; I – модель деформации с позиции сопротивления материалов; II – модель деформации с позиций закона Гука; III – модель деформации тела фрезы, хвостовик и режущая часть которой выполнены из разных материалов; IV – то же, но фреза составная; А-А – ось фрезы;  $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$  – угол наклона оси фрезы (или её участка) к вертикальному расположению обрабатываемой стенки (заштрихована) паза;  $R, R_j$  – радиусы изгиба фрезы (её участка);  $b$  – величина прогиба участка фрезы, которую можно компенсировать предварительным смещением фрезы относительно расположения стенки паза;  $l_k$  – консольная часть длины  $l_\phi$  фрезы;  $l_3$  – часть длины фрезы, располагаемая в зажимном устройстве (штриховка горизонтального участка на 1);  $l_p$  – длина режущей части фрезы;  $\Delta_a, \Delta_b, \Delta_v, \Delta_r$  – величины прогиба нижнего торца фрезы от требуемого вертикального положения обрабатываемой стенки паза;  $h_a, h_b, h_v, h_r$  – вертикальное отклонение торца фрезы от горизонтального положения дна паза

При длине консольной части от 120 до 180 мм величины отклонений существенно отличаются для цельной и составной фрез, но всё ещё укладываются в требования точности, предъявляемые к изделиям общемашиностроительного назначения, в том числе требования точности изделий авиа- и судостроительной отраслей (рис. 4). Натурное моделирование прогиба, рассмотренного в литературе [3; 9 – 11] (см. рис. 4, а), корпуса фрезы в зависимости от величины нормально приложенной силы подтвердило правомерность сказанного выше.

#### Выводы

В результате выполненных с принятыми допущениями расчётов и экспериментов можно констатировать следующее:

1. Жёсткость (по величине отклонения) цельной твёрдосплавной фрезы при предельных значениях режимов резания превосходит жёсткость составной фрезы значительно (до трех раз) только при большой (более 150 мм) длине консольной части фрезы. При меньших значениях силы резания и меньшей длине консольной части фрезы отличия в величинах их отклонений незначительны.

2. Вполне компромиссным решением может оказаться применение составных фрез, у которых высокая циклическая прочность хвостовика будет обеспечена за счёт применения конструкционных материалов, а необходимая производительность обработки будет обеспечена применением твердосплавной режущей части с правильным выбором марки твёрдого сплава, его покрытия и оптимизации режима резания.

3. Область применения цельных фрез может быть ограничена возможностью применения составных фрез. Оправдано применение цельных фрез в тех условиях, где силы резания значительны, например при обработке высокопрочных титановых сплавов. При обработке же менее прочных титановых сплавов, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов, в том числе алюминий-литиевых, конкуренцию цельным фрезам могут составить составные фрезы.

4. Имеются резервы повышения работоспособности концевых составных фрез при повышении передаваемого крутящего момента резания (тангенциальной составляющей силы резания) за счёт оптимизации доли твердосплавной части в общей длине фрезы и за счёт применения покрытий, снижающих силу резания [4 – 8]. При этом экономия инструментального твёрдого сплава достигает 30 – 70 %.

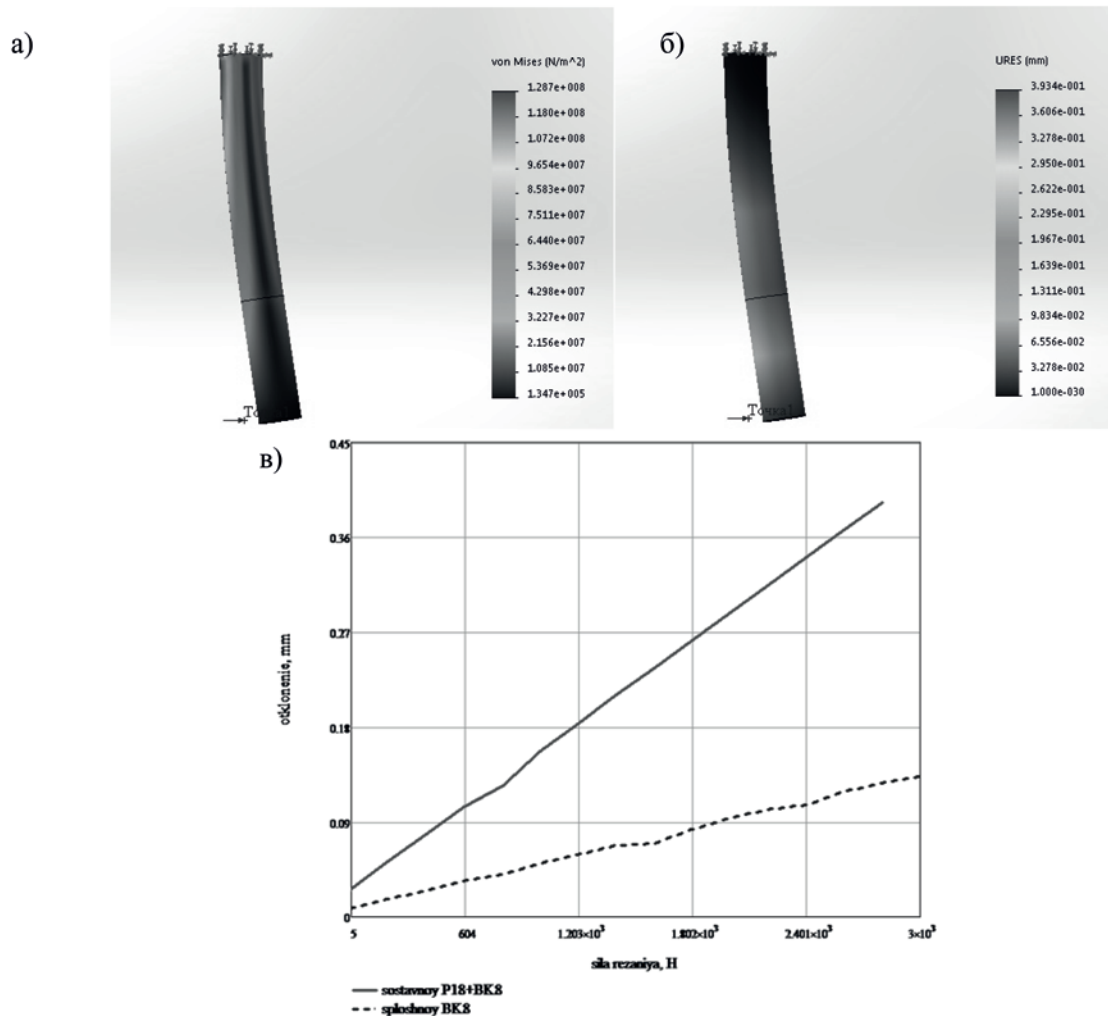


Рис. 4. Картины напряжений (а), расчётной (б) и экспериментальной (в) деформации корпуса составной фрезы

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18372-73. Фрезы твёрдосплавные концевые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1984, – 111 с. (заменён ГОСТ 32405-2013. Фрезы концевые цельные твёрдосплавные. Технические условия)
2. ГОСТ 32405-2013. Фрезы концевые цельные твёрдосплавные. Технические условия. (ISO 10911:2010,MOD). – М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с. (взамен ГОСТ 18372-73)
3. Мокрицкий, Б. Я. Экспресс-метод сравнительной оценки и прогнозирования свойств составных фрез / Б. Я. Мокрицкий [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 3. – С. 209-214.
4. Пат. 154597 Российская Федерация, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим пояском / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Панова Е. А., Мокрицкая Е. Б., Саблин П. А., Кваша В. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т». – № 2015108187/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15. Бюл. № 24.
5. Пат. 154595 Российская Федерация, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и шлицем / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Панова Е. А., Мокрицкая Е. Б., Кваша В. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т». – № 2015108200/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15. Бюл. № 24.
6. Пат. 154596 Российская Федерация, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим конусом / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Панова Е. А., Верещагина А. С., Кваша В. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т». – № 2015108180/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15. Бюл. № 24.
7. Пат. 154594 Российская Федерация, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и крестовым шлицем / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Панова Е. А., Алтухова В. В., Мокрицкая Е. Б., Кваша В. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т». – № 2015108174/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15. Бюл. № 24.
8. Пат. 154593 Российская Федерация, МПК В23С5/10. Фреза составная с центрирующим конусом и шлицевым соединением / Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А., Панова Е. А., Алтухова В. В., Саблин П. А., Кваша В. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т». – № 2015108181/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15. Бюл. № 24.
9. Mokritskii B. Y., Pustovalov D. A., Vereschaka A. A., Vereschaka A. S., Verhoturov A. D. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark / Applied Mechanics and Materials Vols. 719-720 (2015) pp. 96-101. Submitted: 08.08.2014, © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland Accepted: 03.11.2014, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96.
10. B. Y. Mokritskii, D. A. Pustovalov, A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, A. D. Verhoturov: Applied Mechanics and Materials Vol. 719-720 (2015), p. 96.
11. Mokritskii B. Y , Pustovalov D. A., Stupin A., Vereschaka A. A., Serebrennikova A. G., Altukhova V. V. Selection and analysis of parameters for composite carbide end mills / Applied Mechanics and Materials Vol. 703 (2015) pp. 131-136. Submitted: 25.09.2014 © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland Accepted: 19.10.2014 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.703.131.
12. Kundrák, J., Varga, G.: Key Engineering Materials Vol. 496, (2012), pp. 205-210.
13. Varga, G., Dudas, I.: Modelling and examinations of dry machining processes, Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization, (2004), pp. 327-331.



Куликов М. Ю., Ларионов М. А., Гусев Д. В.  
M. Y. Kulikov, M. A. Larionov, D. V. Gusev

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРОТОТИПИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ С УСЛОВИЯМИ  
ИХ БАЗИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ**

**ON THE INTERACTION OF SURFACE ROUGHNESS OF PROTOTYPE SAMPLES  
WITH THEIR LOCATION CONDITIONS IN THE PROCESS OF MANUFACTURING**

**Куликов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН) (Россия, Москва).

**Mr. Kulikov Michael Yu.** – Doctor of Engineering, Professor, Institute of Design-Engineering Informatics, Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow).

**Ларионов Максим Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН (ИКТИ РАН) (Россия, Москва).

**Mr. Larionov Maksim A.** – PhD in Engineering, Higher Senior Officer, Institute of Design-Engineering Informatics, Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow).

**Гусев Денис Витальевич** – аспирант Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС МИИТ) (Россия, Москва).

**Mr. Gusev Denis V.** – Postgraduate, Moscow State University of Railway Engineering (Russia, Moscow).

**Аннотация.** В данной статье описывается одна из более перспективных технологий послойной печати изделий. Приводится краткое описание принципа работы технологии и использованного материала для выращивания образцов. Авторы рассказали о установке, на которой происходило изготовление. Полученные 3D картины поверхностей образцов наглядно показывают, что условия базирования влияют на шероховатость поверхности при прототипировании. Исследование, проведенное нами, помогло найти оптимальную схему базирования во время печати образцов.

**Summary.** This article covers one of the promising layer-by-layer product printing technologies. A brief description of the technology principle and the material used for growing the samples is given. The authors describe the unit for manufacturing. The obtained 3D pictures of surface samples demonstrate that the location conditions affect the rough surface when prototyping. A conducted study helped us find an optimal location scheme when printing samples.

**Ключевые слова:** прототипирование, детали машин, фополимер, технология, шероховатость.

**Key words:** prototyping, machine parts, photopolymer, technology, roughness.

УДК 621.763

В последние годы все большее распространение находят технологии Rapid Prototyping (PR) для изготовления деталей различного назначения. Прототипирование – это быстрая реализация базовой функциональности объекта для анализа работы системы в целом. На этапе прототипирования малыми усилиями создается условно работающая система. После этапа прототипирования в большинстве случаев следуют этапы доработки объекта, разработки, реализации и тестирования конечного продукта. Но в большинстве случаев использование технологий прототипирования приводит к получению изделий, которые используются в реальном производстве напрямую [1].

Эффект от применения быстрого прототипирования выражается в значительном сокращении времени и затрат на разработку новых изделий, а также в повышении качества разработки.

Одна из перспективных технологий выращивания изделий из полимерных материалов является технология Direct Light Projection (DLP). Эта технология одна из самых быстрых, точных и требует минимальных затрат материальных и трудовых ресурсов, что не мало важно в современных условиях рынка машиностроительной продукции.

В технологии DLP для построения модели используется фотополимер, отверждение которого происходит при помощи УФ-излучения. Процесс (см. рис. 1) разработан Texas Instruments и используется фирмой Envisiontec (Германия). На установках компании Envisiontec полимеризация материала осуществляется не по точкам, а послойно, по растровым маскам, благодаря этому скорость построения не зависит от размеров и сложности детали, а только от количества слоев. Скорость построения по Z составляет от 10 до 20 мм/ч в зависимости от толщины слоя [2].

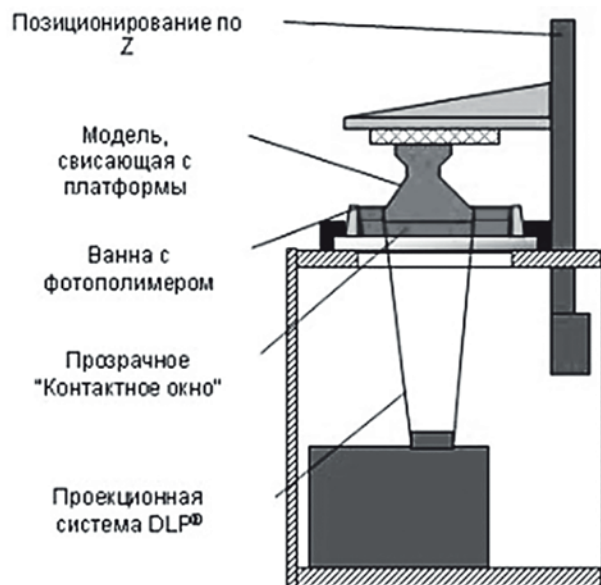


Рис. 1. Принципиальная схема рабочей части Direct Light Projection – DLP

Отличительной особенностью технологии DLP является то, что изделия, получаемые после выращивания и удаления поддерживающих элементов, пригодны для дальнейшего использования без всякой механической и иной доработки, так как отклонения точности деталей не превышают 0,0005 мм и чистота поверхностного слоя соответствует Ra порядка 0,63. Таким точностным характеристикам не каждая технология быстрого прототипирования отвечает, чаще всего после процесса выращивания требуется дополнительная механическая обработка деталей, что увеличивает время изготовления и стоимость конечного продукта.

Но в ходе отработки технологии авторами было замечено, что на точность и качество выращиваемого изделия очень сильно влияет положение его ответственных поверхностей относительно «Контактного окна». При различных схемах базирования выращиваемого изделия качество поверхностного слоя изменялось, но не превышало Ra 0,63.

Цель работы – выявить влияние базирования выращиваемого изделия на шероховатость во время процесса формообразования при прототипировании.

В качестве образцов были выбраны пластины размером 10x10x3 мм, а исследуемой поверхности – плоскость 10x10 мм. Несколько серий пластин из высокотемпературного фотополимера HTM-140 по технологии Direct Light Projection (DLP) были напечатаны на 3D

принтере – Envisiontec Ultra2. Пластины, изготовленные из НТМ-140, после извлечения из принтера имеют температурную стойкость 140 °С без дальнейшей механической доработки. Материал НТМ-140 – один из самых востребованных среди представленных компаний Envisiontec в машиностроение. Серия состоит из пяти пластин, каждая из которых отличается между собой тем, что угол наклона между исследуемой базовой поверхностью и «Контактным окном» варьировался от 0° до 10° с шагом в 2°.

Результаты исследований каждой серии образцов представлены на рис. 2-7 соответственно.

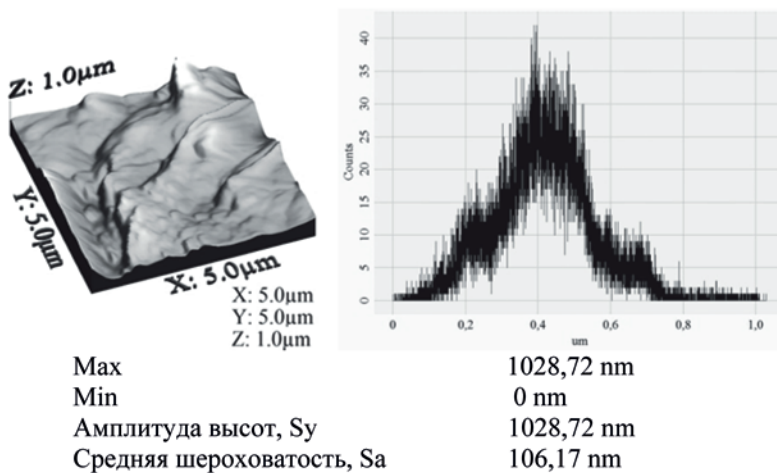


Рис. 2. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 1-й серии образцов с углом наклона базовой поверхности 0°

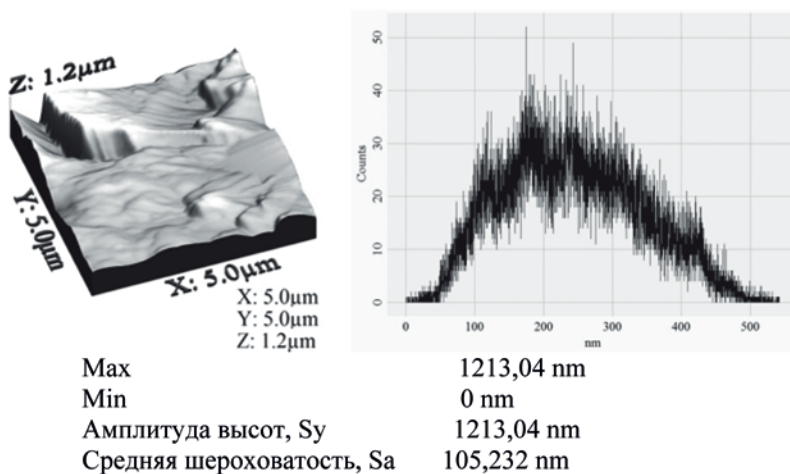


Рис. 3. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 2-й серии образцов с углом наклона базовой поверхности 2°

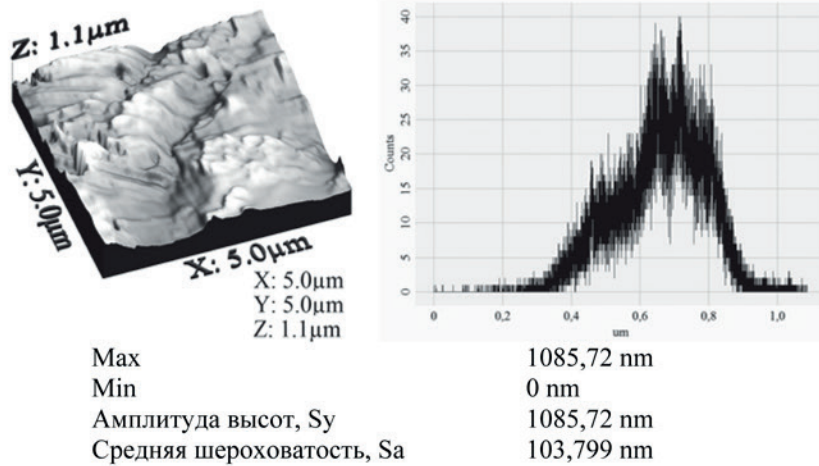


Рис. 4. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 3-й серии образцов с углом наклона базовой цповерхности 4°

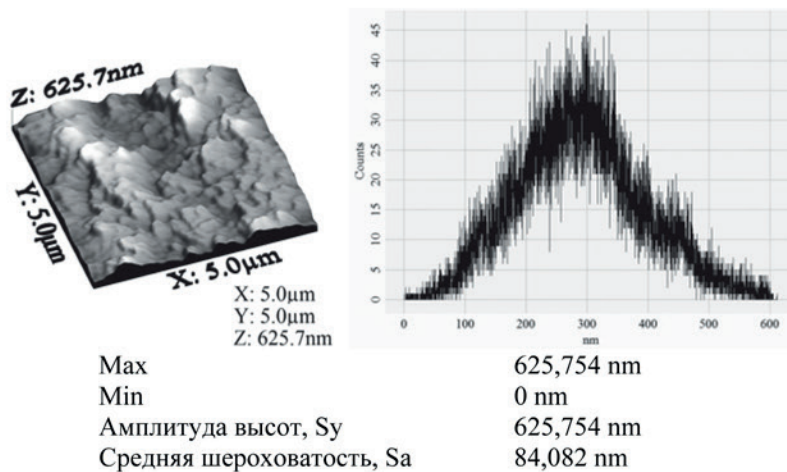


Рис. 5. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 4-й серии образцов с углом наклона базовой поверхности 6°

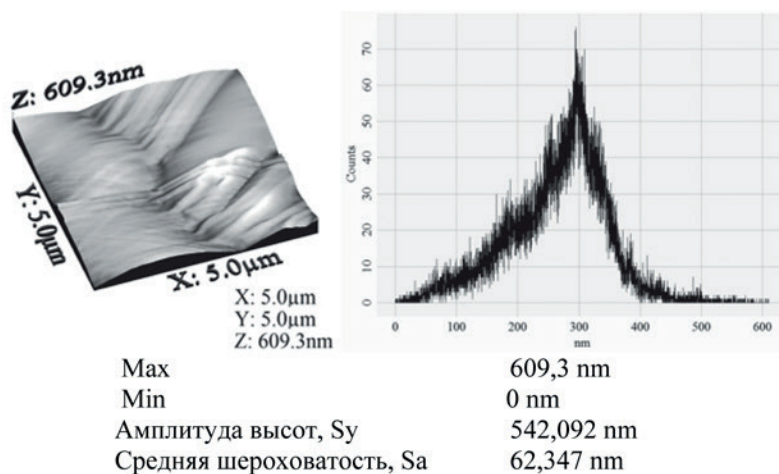


Рис. 6. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 5-й серии образцов с углом наклона базовой поверхности 8°

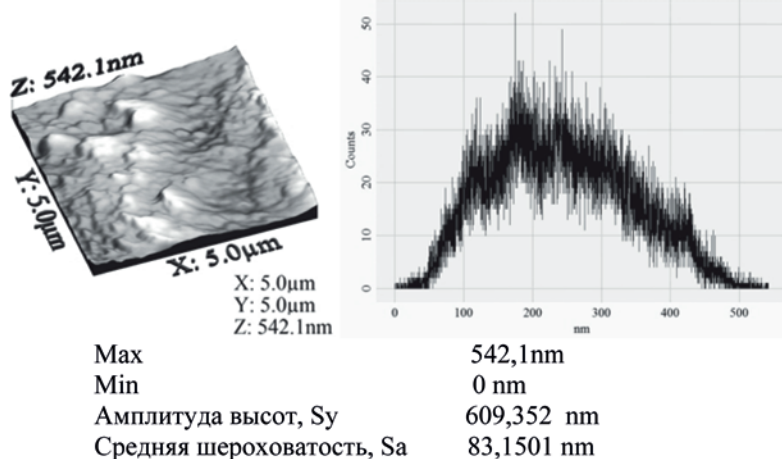


Рис. 7. Трехмерная картина и диаграмма состояния поверхностного слоя 6-й серии образцов с углом наклона базовой поверхности  $10^\circ$

Из представленных результатов видно, что при формировании плоской поверхности методами быстрого прототипирования по технологии DLP самой оптимальной схемой базирования является та, у которой угол наклона базовой плоскости соответствует  $8^\circ$ . Это объясняется тем, что площадь выращиваемого слоя меньше, чем при угле наклона  $0^\circ$  и в процессе отлипания от «Контактного окна», воздействие следующего слоя минимально на предыдущий слой, который еще до конца не заполимеризовался. А при угле наклона базовой поверхности более  $8^\circ$  отрицательное воздействие осуществляет сила тяжести, которая приводит к сдвигу недополимеризованного слоя и повышению шероховатости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грабченко, А. И. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.
2. <http://www.cybercom.ru>
3. <http://www.3D-systems.com>

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
METALLURGY AND MATERIALS

**ЯКИМОВ В. И.** Евстигнеев А. И., Захарова Е. В., Куриний В. В., Муравьев В.И.  
**V. I. Yakimov** A. I. Yevstigneev, E. V. Zaharova, V. V. Kuriniy, V. I. Muravyev

**ВЛИЯНИЯ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА  
НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**INFLUENCE OF CONSTANT ELECTRIC CURRENT ON THE PROCESS  
OF ALUMINUM ALLOYS CRYSTALLISATION**

**Якимов Виктор Иванович** – доктор технических наук, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.

**Mr. Yakimov Victor I.** – Doctor of Engineering, JSCo «Komsomolsk-on-Amur Aircraft Production Association named after Yu.A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 52-63-17.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, советник при ректоре Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: msf@knastu.ru.

**Mr. Evstigneev Alexey I.** – Doctor of Engineering, Professor, Honored Master of Sciences, Rector's Adviser, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: msf@knastu.ru.

**Захарова Елена Викторовна** – инженер-технолог, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.

**Ms. Zaharova Elena V.** – industrial engineer, JSCo «Komsomolsk-on-Amur Aircraft Production Association named after Yu.A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 52-63-17.

**Куриний Владислав Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроения и металлургия Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru

**Mr. Kuriniy Vladislav V.** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

**Mr. Vasiliy I. Muravyev** – Doctor of Engineering, professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье описываются результаты исследований особенностей изготовления литьём в кокиль отливок «гребешковой» и «рожковой» формы из сплава АМ4, 5Кд.

**Summary.** The article describes the results of studies of comb and bugle castings production. They are manufactured from alloys АМ4,5Kd with the help of chilling.

**Ключевые слова:** электрический ток, форма, химический состав, АL-Si сплавы.

**Kew words:** electric current, shape, chemical composition, АL-Si alloys.

УДК 621.74

Известно, что на процесс кристаллизации сплавов влияет очень много факторов, но основным является теплопередача. Только направленный теплоотвод может дать возможность решить вопрос управления кристаллизацией сплава.

Управление теплопередачей в основном базируется на создании температурного градиента между жидким сплавом и формой или его частями, формирующими конфигурацию отливки (стержни, холодильники). Это является основной трудностью управления процессом, так как практически теплоотвод является нерегулируемым.

Известно, что теплоотвод осуществляется как за счет электронной, так и фононной теплопроводности [1], т.е. как за счет передачи энергии электронами, так и за счет колебаний атомов. У металлов в основном превалирует электронная теплопроводность, а металлоидов – фононная. У жидких сплавов теплоотвод осуществляется как за счет электронной теплопроводности, так и за счет фононной. Было предположено, что воздействие электричества на электронную теплопроводность жидкого сплава даст возможность решить вопрос управления процессом кристаллизации.

Из работ [2; 3] известно, при воздействии постоянного тока на жидкий металл возникает между жидкой и твердой фазой эффект Пельтье, используемый при зонном плавнении. Этот эффект и был применен при управлении кристаллизацией.

Для этой цели использовался выпрямитель постоянного тока собственного изготовления на диодах В-200 с тиристорной цепью управления, позволяющей осуществлять плавную регулировку тока в пределах 10...100 А. Величина постоянного тока контролировалась амперметром типа М-4200.

Расплав заливался в низко теплопроводную форму из шамота, нагретую до температуры около 250...300 °С. В этой форме отливали бруски размерами 220×100×100 мм.

Сплав АК7ч в этой форме кристаллизовался в течение 5 мин под воздействием постоянного тока. Одновременно такая же отливка кристаллизовалась без воздействия электрического тока. Образцы разрезались пополам. Вид по разрезу показан на рис. 1, 2. На срезе видно, что со стороны катода в нижней части отливки образовалась газовая раковина, которая располагается на нижнем конце электрода. Это связано, вероятно, с тем, что заряды скапливаются на концах электродов, где ионы водорода переходят в нейтральное состояние.

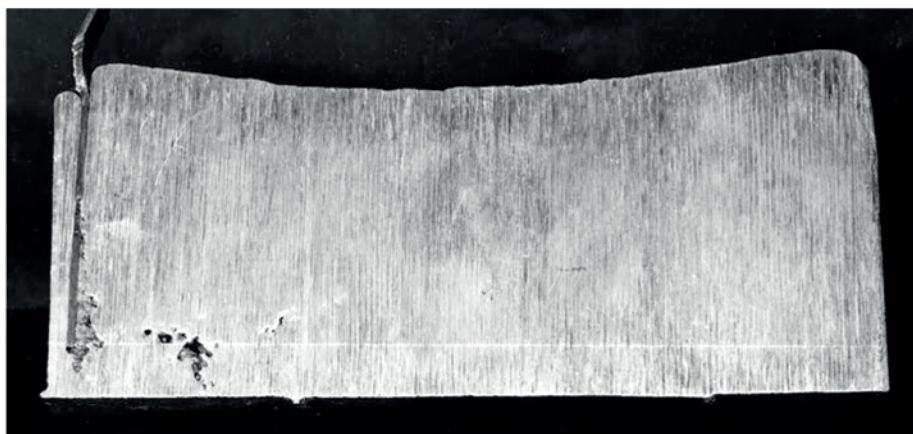


Рис. 1. Отливка, кристаллизовавшаяся под воздействием постоянного тока ( $I = 50$  А)



Рис. 2. Отливка, кристаллизовавшаяся без воздействия постоянного электрического тока

Полученные внутренние поры видны на рентгеновском снимке (см. рис. 3, 4). Представляет интерес то, что сплав с широким интервалом кристаллизации после воздействия электрического тока со стороны анода отливки имеет плотную структуру до 0,57 длины, а далее появляются раковины усадочно-газового характера. Отливки с кристаллизацией в обычных условиях имеют рассредоточенные поры по всей центральной части отливки.

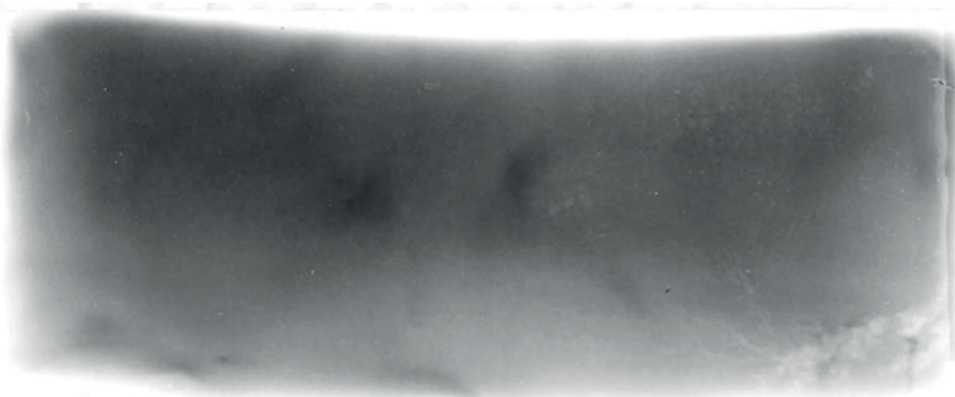


Рис. 3. Рентгеновский снимок внутренней структуры отливки, кристаллизовавшейся под воздействием постоянного электрического тока ( $I = 50 \text{ A}$ )

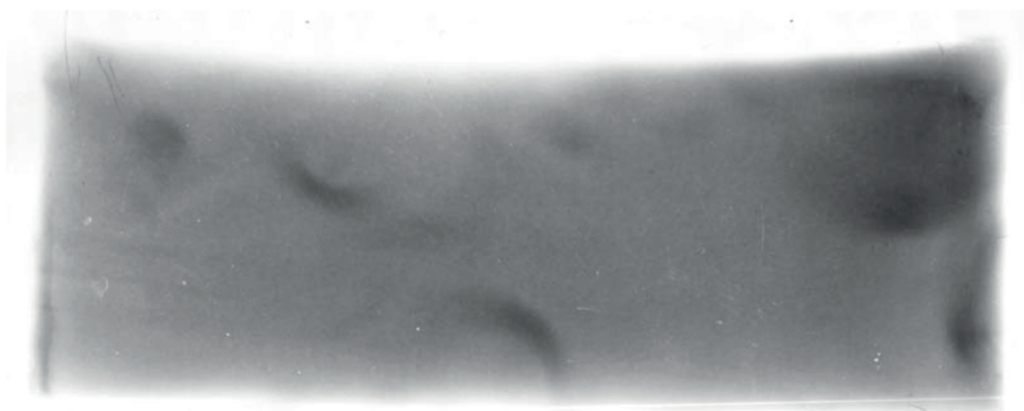


Рис. 4. Рентгеновский снимок внутренней структуры отливки, кристаллизовавшейся в обычных условиях

Таким образом, воздействие электрического тока на жидкий алюминиевый сплав создает направленную кристаллизацию от анода к катоду, т.е. горячая зона продвигается к ка-



тоту. В условиях отливки горячей зоной является прибыль. Этот эффект заложен в технологический процесс кристаллизации отливок в песчаные формы, а также для управления процессом кристаллизации кокильных отливок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сталеплавильное производство: справочник. Т. 1. – М.: Металлургия, 1964.
2. Термодинамическое охлаждение / А. Ф. Иоффе [и др.]. – М.: АН СССР, 1956.
3. Иоффе, А. Ф. Курс теоретической физики / А. Ф. Иоффе. – М., 1956.

**Ким В. А., Катунцева Н. Л., Кочетков М. С.**  
**V. A. Kim, N. L. Katuntseva, M. S. Kochetkov**

## **МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЖЕЛЕЗА-АРМКО ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

### **MULTIFRACTAL ANALYSIS OF STRUCTURAL IRON-ARMKO TRANSFORMATIONS IN LASER PROCESSING**

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27. Тел./факс: (4217)537046; сот. тел.: 8-914-373-2534. E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Катунцева Наталья Владимировна** – старший преподаватель кафедры «Высшая математика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27. E-mail: kvm@knastu.ru.

**Ms. Natalya V. Katuntseva** – Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kvm@knastu.ru.

**Кочетков Марк Сергеевич** – магистр по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27. Тел./факс: (4217) 537046. E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Mr. Mark S. Kochetkov** – master in Materials Technology and New Materials Technology. Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Аннотация.** Спектр мультифрактальных размерностей структурной организации материала позволяет анализировать структурные превращения, которые сложно поддаются идентификации традиционными методами количественной металлографии. Установлена тесная взаимосвязь между компонентами спектра мультифрактальных размерностей структур, сформированных лазерной обработкой железа-армко, и его прочностными свойствами. По спектрам мультифрактальных размерностей можно вычислять комплексные показатели, характеризующие упорядоченность и периодичность в структурной организации материала. Показано, что, начиная с определенных режимов лазерного воздействия в структурных превращениях, процессы, связанные с уменьшением плотности дефектов кристаллического строения, начинают превалировать над их генерацией. Это отражается на показателях упорядоченности, которые можно использовать для оптимизации режимов обработки.

**Summary.** The range of multifractal dimensions of the structural organization of materials allows analyzing structural transformations that are difficult to identify by traditional methods of a quantitative metallography. The close interrelation between components of multifractal dimensions of the structures created by laser iron-armko processing, and its strength properties is established. The ranges of multifractal dimensions make it possible to calculate the integral indicators characterizing the order and frequency in the structural material organization. It is shown that certain modes of laser influence in structural transformations cause the processes connected with defects density reduction of a crystal structure. These processes prevail over their generation. It is reflected in the order of indicators, which can be used for optimization of the processing modes.

**Ключевые слова:** микроструктура, мультифрактальные размерности, упорядоченность, периодичность, лазерная обработка, упрочнение, дефекты, дислокации.

**Keywords:** microstructure, multifractal dimensions, order, frequency, laser processing, hardening, defects, dislocations.

УДК 621.375.826

## Введение

Лазерное воздействие на металлические материалы проявляется в первую очередь как мощный тепловой источник, инициирующий развитие высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения, которые определяют кинетику неравновесных структурных превращений. Поверхностные структуры, возникающие при лазерной обработке, характеризуются высокой плотностью дефектов кристаллического строения, связаны с образованием таких химических соединений и структурных вариаций, которые не могут возникать в традиционных металлургических процессах и технологиях термической и деформационной обработки. Такие структуры формируются по синергетическим алгоритмам в неравновесных термодинамических условиях, и им присуще упорядоченность на одних масштабных структурных уровнях и высокая степень неоднородности на других. Особенность строения подобных структур обеспечивает уникальность их физико-механических и функциональных свойств, которые определяют перспективы развития инновационного материаловедения [1; 2; 3].

Для анализа строения, моделирования и прогнозирования физико-механических свойств упрочненных и модифицированных структур, сформированных в неравновесных условиях взаимодействия материалов с концентрированными потоками энергии, традиционные металлографические показатели не отражают в полной мере их структурную организацию, теряют свою эффективность в первую очередь с информационной точки зрения. Развитие мультифрактальных методов параметризации в значительной мере устраняет многие информационные проблемы описания неравновесных и неоднородных структур материалов и упрощает их моделирование.

В основе мультифрактальной параметризации строения материала лежит представление о его многоуровневой организации, которую можно отобразить в виде комплексного множества структурных количественных показателей, состоящего из подмножеств разных масштабов. Само множество и подмножества обладают фрактальностью, при этом для описания подмножеств высоких масштабных уровней используются свои фрактальные показатели, которые в совокупности представляют мультифрактальные параметры [4; 5].

Для расчета фрактальных и мультифрактальных параметров вводится понятие меры, под которым понимают какую-либо количественную характеристику, отражающую структурное строение или свойство объекта. Тогда исследуемый объект представляется как совокупность мер, объединенных в единое множество и погруженное в какое-либо пространство. Мерность самого пространства и физический смысл каждой координаты определяется природой объекта, но для определения мультифрактальных параметров пространство интерпретируется как геометрическое или евклидовое. Множество мер делится на подмножества, каждое подмножество в свою очередь делится на подмножества более высокого ранга и т.д. [6].

Меры представляются в относительных величинах, с помощью которых можно рассчитывать вероятностные кривые распределения в зависимости от характеристического размера ячеек дробления евклидового пространства. В качестве мер для вычисления фрактальных и мультифрактальных параметров структуры материалов можно использовать количество микроструктурных объектов на единичной площади металлографического шлифа, размер зерен, их площадь и длину периметра границ, уровень темно-серого оттенка и т.п. [7-10].

Обобщенная статистическая сумма является базовым понятием мультифрактального формализма и определяется

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon),$$

где  $q$  – целочисленная величина от  $-\infty$  до  $+\infty$ , используемая для генерации мультифрактальных характеристик;  $\varepsilon$  – характеристический размер ячейки дробления;  $N(\varepsilon)$  – количество ячеек дробления;  $p_i$  – мера количественной оценки какого-либо структурного свойства материала.

Меры должны отвечать следующему условию

$$\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) = 1. \quad (1)$$

Условие (1) выдерживается только на основном базовом уровне при  $q = 0$ .

Генерация фрактальных размерностей или спектра обобщенных мультифрактальных размерностей, характеризующих данное структурное состояние материала, определяется

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1},$$

где функция  $\tau(q)$  имеет вид

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, \varepsilon)}{\ln \varepsilon}.$$

Учитывая, что вычисление спектра мультифрактальных размерностей производится по обобщенной статистической сумме  $Z(q, \varepsilon)$ , сами составляющие спектра являются статистически усредненными величинами, при этом можно выделить один компонент, который вносит наибольший вклад в ее локальное значение. Для каждого  $q$  эта фрактальная размерность принимает значение  $\alpha_q$ , а их совокупность для разных значений  $q$  образует свой мультифрактальный спектр  $f(\alpha_q)$ .

Используя полученный спектр мультифрактальных размерностей, можно вычислить комплексный показатель

$$\Delta_q = D_1 - D_q.$$

Отдельные составляющие спектра мультифрактальных размерностей  $D_q$  и  $f(\alpha_q)$  характеризуют структурно-энергетическое состояние материала и полноту информационного отражения, а комплексные показатели  $\Delta_q$  степень упорядоченности, периодичности и однородности его структуры [5; 6].

Расчет спектра мультифрактальных размерностей производится по изображениям микроструктур с использованием специальной программы MFRDrom, разработанной Институтом металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Идентификация структурных составляющих осуществляется путем травления металлографического шлифа специальными реактивами, при этом микроструктуры с более темными оттенками характеризуются более высокой величиной свободной энергии или химическим потенциалом. Различные составляющие спектра мультифрактальных размерностей имеют математически обоснованный физический смысл, поэтому они находят широкое применение при анализе условий формирования структуры и прогнозировании их эксплуатационных свойств.

В предлагаемой статье приведены результаты исследований микроструктуры железа-армко, сформированной лазерной обработкой, раскрывающие связь между структурной организацией материала и его механическими свойствами.

### Методика исследования

Исследовались структурные изменения армко-железа при импульсном лазерном воздействии. Выбор исследуемого материала обосновывался тем, что структурные превращения в железе-армко, вызванные термическим воздействием, проявляются в «чистом» виде без участия закалочных процессов, и их можно рассматривать как эталонный процесс при сравнительном анализе структурных превращений в углеродистых и легированных сталях и сплавах [1].

Упрочнение осуществлялось на импульсно-периодической лазерной установке LRS-300 излучением с длиной волны  $\lambda = 1,064$  мкм. Плотность мощности (В) и удельная энергия (Е) излучения рассчитывались по формулам

$$B = \frac{4W}{\pi d^2 \tau_u},$$

$$E = \frac{4W}{\pi d^2},$$

где W и  $\tau_u$  – энергия и длительность лазерного импульса; d – диаметр пятна воздействия. Режимы лазерной обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы лазерной обработки

Номер режима	W, Дж	d, м	$\tau_u$ , с	$E \cdot 10^6$ , Дж/м <sup>2</sup>	$B \cdot 10^9$ , Вт/м <sup>2</sup>
1	6,0	0,002	0,001	1,91	1,91
2	9,0	0,002	0,002	2,87	1,43
3	13,0	0,002	0,002	4,14	2,08
4	19,0	0,002	0,003	6,05	2,02
5	25,0	0,002	0,004	7,96	1,99

Металлографические шлифы изготавливались по традиционной методике на автоматическом станке AutoMet 250. Травление осуществлялось 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте. Микроструктура фиксировалась с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 при 1000-кратном увеличении, а обработка изображений осуществлялась программой Image.Pro.Plus.5.1. Микротвердость определялась с помощью микротвердомера НМV-2.

Расчет спектра мультифрактальных размерностей осуществлялся с помощью программы MFRDrom. Для этого из оцифрованных изображений исследуемых микроструктур вырезались фрагменты размером 350x350 пикселей, и с них снималась контрастная маска. Выделение границ микроструктурных элементов выполняли с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1, используя фильтр Лапласа. В результате получали так называемые «скелетированные» изображения, по которым определялись мультифрактальные показатели структурной организации материала. Генерация спектра мультифрактальных размерностей осуществлялась в диапазоне  $0 < q < +40$ . В качестве основных показателей для структурного анализа принимались  $D_0, D_1, D_2, D_{40}$ , а также  $\Delta_{40}, f(\alpha)$  или  $\alpha_{40}$ . Комплексный показатель  $\Delta_{40}$  характеризует однородность и упорядоченность, а  $\alpha_{40}$  – периодичность.

### Полученные результаты и их анализ

На рис. 1 приведены микроструктуры армко-железа в исходном состоянии и после лазерной обработки на различных режимах. Первый режим лазерной обработки обеспечивал структурные превращения в твердофазной области. Другие режимы вызывали оплавление поверхностного слоя, поэтому на фотографиях микроструктур четко выделяется слой, сформированный закалкой из жидкой фазы и зоны термического влияния (ЗТВ).

В зависимости от режимов лазерного воздействия структурные изменения в обрабатываемом материале происходят при разных температурах, градиентах термических напряжений, скоростях нагрева и охлаждения. Упрочнение армко-железа, в котором углерод и ле-

гирующие элементы присутствуют в незначительной концентрации, происходит главным образом за счет развития вакансий, дислокаций и границ зерен и субзерен, инициированного тепловым импульсом. Основную роль в упрочнении поликристаллических материалов при импульсном тепловом воздействии играют дислокации, возникающие на границах в период роста кристаллитов, а также в процессе миграции границ и вблизи концентраторов напряжений разных масштабных уровней. В твердофазной области развитие упрочненных структур определяется процессами полиморфных превращений и рекристаллизации, а в жидкофазной – соотношением скоростей образования центров кристаллизации и роста зерен. На эти процессы сильное влияние оказывает температура перегрева, положение изотерм полиморфных и фазовых превращений, которые при лазерном воздействии носят активный динамический характер [2; 3].

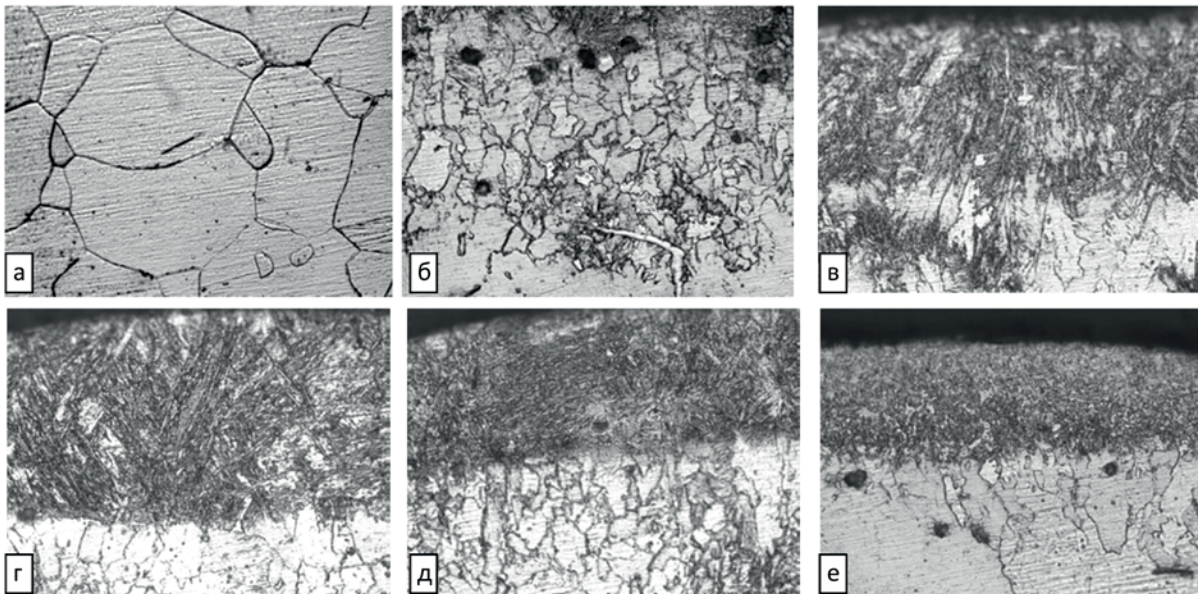


Рис. 1. Различные микроструктуры армко-железа после лазерной обработки:  
а – исходная; б – ЗТВ (1 режим); в – ЗР (2 режим); г – ЗР (3 режим);  
д – ЗР (4 режим); е – ЗР (5 режим)

Микроструктура в зоне термического влияния (ЗТВ) характеризуется мелкими зернами неравноосной формы, ориентированными вдоль вектора градиента температур. Структуры, сформированные в зоне расплава (ЗР), преимущественно состоят из дендритов первого порядка, ориентированных вдоль вектора градиента температуры. При высокой температуре перегрева скорость роста центров кристаллизации достигает максимальных величин, и формируется ультрадисперсная микроструктура, состоящая из равноосных зерен. При высоких скоростях нагрева и охлаждения граница между твердофазной и жидкофазной областями принимает более четкие очертания.

На рис. 2 представлено влияние удельной энергии лазерного воздействия на мультифрактальные размерности сформированной поверхностной структуры. С увеличением энергии лазерного воздействия все составляющие мультифрактального спектра уменьшаются. Это указывает на снижение энтропийных показателей и более высокое содержание свободной энергии образованных структур или их химических потенциалов.

В табл. 2 приведены значения комплексных мультифрактальных показателей микроструктур после лазерной обработки.

Таблица 2

Значения мультифрактальных показателей микроструктур после лазерной обработки

Показатель	Исходная структура	Удельная энергия лазерного воздействия $W$ , МДж/м <sup>2</sup>				
		1,91	2,87	4,14	6,05	7,96
$\Delta_{40}$	0,004	0,061	0,085	0,037	0,055	0,024
$\alpha_{40}$	1,991	1,956	1,879	1,888	1,897	1,896

По характеру изменения мультифрактальных спектров можно заключить, что структурные изменения в результате воздействия лазерного излучения протекают по единым алгоритмам, отличаясь незначительно на количественном уровне. В общем случае с повышением энергии лазерного воздействия химический потенциал упрочненной структуры возрастает. Но в области удельных энергий  $W > 4,14$  МДж/м<sup>2</sup> происходит количественный скачок в структурной организации поверхностных слоев, связанный с резким увеличением внутренней энергии структурного состояния.

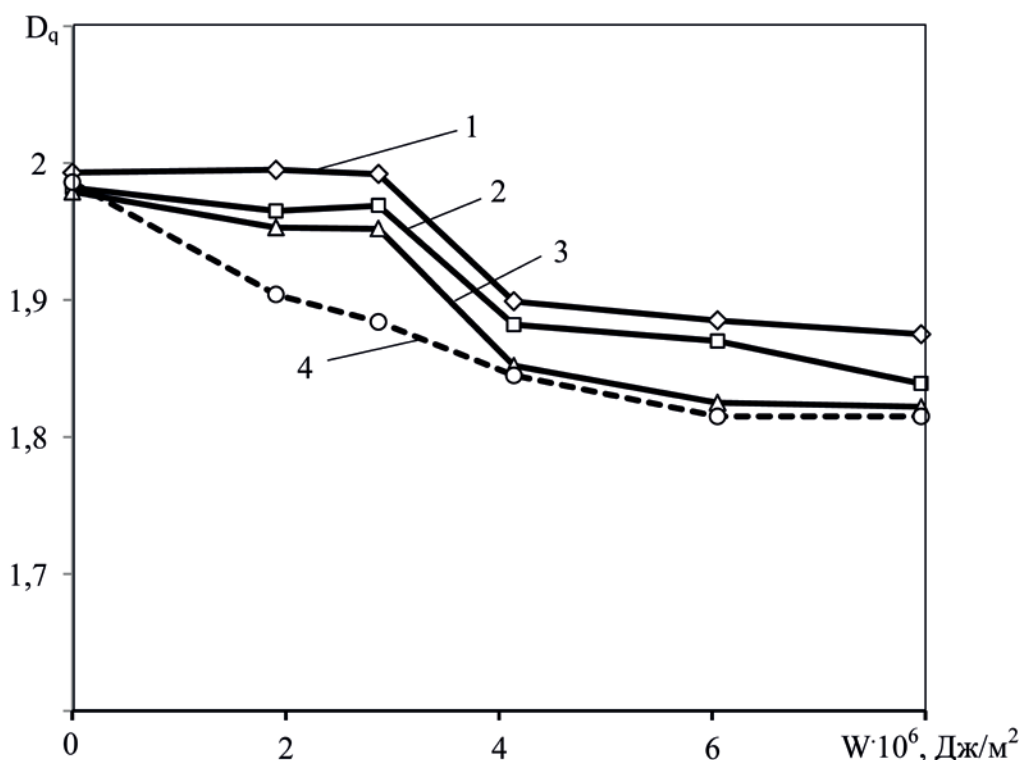


Рис. 2. Влияние плотности энергии лазерного воздействия на мультифрактальную размерность поверхностных структур:  
1 –  $D_0$ ; 2 –  $D_1$ ; 3 –  $D_2$ ; 4 –  $D_{40}$

На рис. 3 приведено влияние удельной энергии лазерного воздействия на микротвердость упрочненного поверхностного слоя. Экстремальный характер изменения этой зависимости указывает на влияние минимум двух конкурирующих факторов на процесс развития упрочненных структур, к которым можно отнести генерацию различных дефектов кристаллического строения и процесс их вырождения и аннигиляции за счет высокой температуры. С термодинамической точки зрения эти процессы представляются как активационный и диссипативный. Синергетический алгоритм структурных превращений под действием концентрированных потоков энергии предусматривает образование высокоэнергетических структур с высокой степенью упорядоченности на определенных масштабных уровнях. Лазерная

обработка всегда приводит к развитию микроструктур упорядоченного строения по сравнению с исходным состоянием. Упорядоченность охватывает преимущественно нано- и микро-масштабные уровни. В области развития наиболее упорядоченной микроструктуры располагается максимум микротвердости.

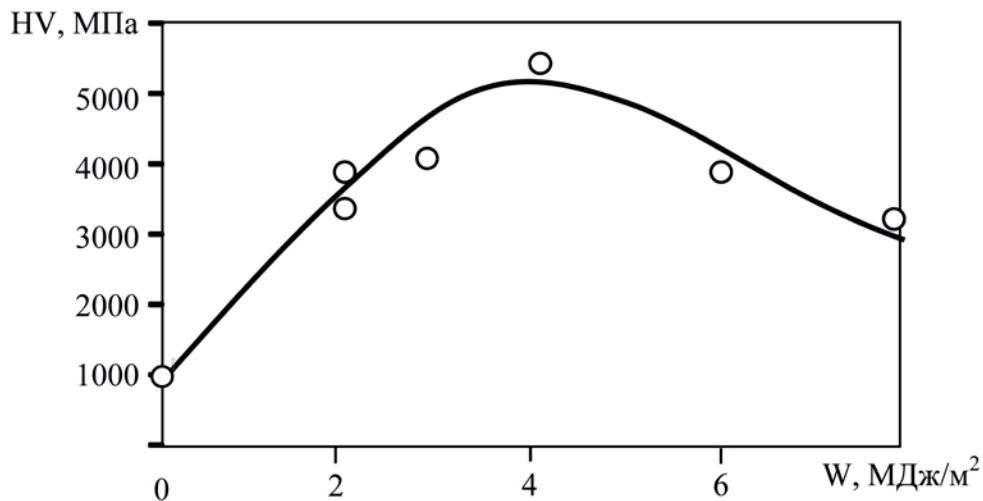


Рис. 3. Влияние удельной энергии лазерного излучения на твердость поверхностной структуры армко-железа

Высокая степень структурной упорядоченности материала обеспечивает диссипацию энергии из зоны лазерного воздействия за счет процессов массопереноса на микро- и наномасштабном уровне. Показатель  $\Delta_{40}$  характеризует структурную упорядоченность, с повышением которой возрастает степень ближнего порядка. Экстремальность изменения структурной упорядоченности упрочненных поверхностей с повышением энергии лазерного воздействия четко просматривается при анализе результатов табл. 2, но для выявления функциональной связи необходимы более глубокие исследования.

Снижение упорядоченности в области режимов лазерной обработки, превышающих  $W > 4,14$  МДж/м<sup>2</sup>, является формой проявления деградации упрочненных структур, которые сложно различить визуально, но можно с высокой степенью достоверности выявить с помощью мультифрактальных параметров структурной организации материала.

Показатель  $\alpha_{40}$ , характеризующий периодичность и устойчивость структурного состояния, больше отвечает за дальнюю упорядоченность. Этот параметр слабо реагирует на изменение режимов лазерной обработки, указывая, что сформированные структуры обладают близкой структурной устойчивостью. С повышением энергии лазерного воздействия устойчивость упрочненной микроструктуры снижается.

### Заключение

1. Спектр мультифрактальных размерностей, вычисляемый по цифровым изображениям микроструктуры материала, позволяет анализировать с высокой степенью достоверности такие структурные превращения, которые невозможно идентифицировать никакими традиционными методами количественной металлографии. Математическая теория фракталов и мультифракталов раскрывает физическую связь между отдельными компонентами мультифрактального спектра и структурно-энергетическим состоянием материала как системы количественных мер в евклидовом пространстве.

2. Установлено, что с повышением энергии лазерного воздействия все компоненты спектра мультифрактальных размерностей уменьшаются, подтверждая, что структуры, сформированные при воздействии на материалы высококонцентрированных потоков энергии, обладают большей свободной энергией. Величина химического потенциала в свою очередь определяет микротвердость и некоторые прочностные свойства материала.

3. Экстремальный характер изменения микротвердости от энергии лазерного воздействия указывает, что на формирование модифицированной поверхностной структуры оказывают влияние, как минимум, два конкурирующих процесса: генерация дефектов кристаллического строения и их деградация.

4. Деградацию упрочненной структуры можно выявлять по изменению комплексных мультифрактальных показателей, таких как  $\Delta_{40}$  и  $\alpha_{40}$ , отвечающих за структурную упорядоченность, периодичность и устойчивость. Изменение этих показателей фиксируется значительно раньше, чем количественные металлографические характеристики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данильченко, В. Е. Лазерное упрочнение технического железа / В. Е. Данильченко, Б. Б. Польчук // Физика металлов и металловедение. – 1998. – Т. 86. – № 4. – С. 124-128.
2. Рыкалин, Н. Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
3. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, И. Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1988. – 537 с.
4. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
5. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г. В. Встовский, А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин. – М.-Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 116 с.
6. Божок, С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божок, Д. А. Паршин. – Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 116 с.
7. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / V. A. Kim, V. V. Petrov, A. V. Butin, I. V. Belova, A. A. Shpileva // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 52. № 3-84. – 2010. – p. 163-165.
8. Kim, V. A. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / V. A. Kim, I. V. Belova, A. V. Boutin // Modern materials and technologies. – 2013. – № 1. – p. 126-131.
9. Башков, О. В. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / О. В. Башков, В. А. Ким, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. – Т. 79. – №10. – С. 34-40.
10. Статистическая оценка количественной металлографии / В. А. Ким, Р. В. Евдокимова, С. В. Золотарева, А. А. Попкова, М. Йошида // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14). – С. 76-82.

Ким В. А., Башков О. В., Попкова А. А.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАРБИДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

**Ким В. А., Башков О. В., Попкова А. А.**  
**V. A. Kim, O. V. Bashkov, A. A. Popkova**

## **КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАРБИДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ**

## **QUANTITATIVE ASSESSMENT OF QUICK CUTTING STEELS CARBIDE HETEROGENEITY BY MEANS OF THE COMPUTER METALLOGRAPHY**

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru

**Башков Олег Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедения и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ckr@knastu.ru.

**Mr. Oleg V. Bashkov** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ckr@knastu.ru.

**Попкова Александра Александровна** – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Ms. Alexander A. Popkova** – PhD Candidate, Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Аннотация.** Стандартная процедура определения карбидной неоднородности основана на визуальном сравнении изображений микроструктур углеродистых сталей с эталоном, и характеризуется низкой точностью и субъективностью. Предлагается методика определения карбидной неоднородности с использованием количественных показателей структурной организации материала и компьютерной металлографии. Разработаны количественные критерии неоднородности, в основе которых лежит плотность карбидных включений и среднее расстояние между ними. На примере быстрорежущих сталей проведены тестовые исследования, раскрывающие эффективность предлагаемой методики.

**Summary.** Standard procedure of carbide heterogeneity determination is based on the visual comparison of images of carbonaceous steels microstructures with a standard, and is characterized by the low accuracy and subjectivity. The technique of carbide heterogeneity determination using quantitative indices of the material structural organization and a computer metallography is offered. Quantitative criteria of heterogeneity, which is based on density of carbide inclusions and average distance between them, are developed.

The test researches providing efficiency of the offered technique are conducted by the example of quick cutting steels.

**Ключевые слова:** карбидные включения, неоднородность, микроструктура, механические свойства, быстрорежущие стали.

**Key words:** carbide inclusions, heterogeneity, microstructure, mechanical properties, quick cutting steels.

УДК 669.14.018.252.5

## Введение

Карбидная неоднородность влияет на многие физико-механические и эксплуатационные свойства сталей и сплавов на основе железа. Карбидные микроструктуры представляют совокупность частиц разных размеров, объединенных в полосчатые колонии или крупные скопления неправильной формы. Мелкие карбидные частицы блокируют скольжение дислокаций и тормозят миграцию границ зерен, приводя к повышению твердости, а крупные - образуют концентраторы напряжений микро- и мезомасштабного уровня, которые могут стать очагами разрушений. С повышением концентрации углерода и легирующих карбидообразующих металлов карбидная неоднородность сталей и сплавов на основе железа возрастает. Неоднородность распределения карбидов определяет анизотропию механических свойств, которая негативно проявляется на пластической деформации при обработке металлов давлением [1; 2].

Методика определения карбидной неоднородности основана на визуальном сравнении распределения карбидов на фотографиях микроструктуры исследуемой стали, снятой при 100 кратном увеличении, и на эталонных изображениях, ранжированных по баллам в зависимости от размеров и характера распределения карбидных включений, объединенных в единую шкалу. Для различных классов сталей существует своя шкала и число баллов карбидной неоднородности. Для быстрорежущих сталей согласно ГОСТ 19265-73 предусмотрено две шкалы для высоковольфрамовых и низковольфрамовых, в том числе, вольфрамомолибденовых сталей, включающих 8 баллов карбидной неоднородности [3].

Каждый балл карбидной неоднородности характеризуется допустимой шириной и длиной полос, представляющих скопления карбидных частиц. В табл. 1 представлены допустимые значения ширины и длины полос карбидных включений применительно к быстрорежущим сталям [3].

Таблица 1

Допустимая ширина  $\delta_n$  и длина  $f_c$  полос (скопление карбидов)  
на микрофотографиях при 100 кратном увеличении, мм

Шкала		Балл карбидной неоднородности							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Шкала 1	$\delta_n$	2	4	6	8	13	15	20	25
	$f_c$	10	20	24	32	65	75	100	125
Шкала 2	$\delta_n$	1	2	4	5	6	9	14	18
	$f_c$	5	10	20	25	30	45	70	90

Стандартом предусмотрена только оценка скопления карбидов в полосчатых образованиях, при этом структурная организация самой полосчатости не регламентируется, а их равномерность распределение по объему оценивается визуально. Современные металлографические микроскопы могут фиксировать изображения микроструктур при увеличениях 1000 крат и более, что позволяет выявлять структурную организацию скоплений карбидов.

Визуальная оценка карбидной неоднородности отличается низкой точностью и во многом зависит от квалификации металлографа. Использование изображений микроструктур с увеличением более чем 100 крат не предусмотрено стандартами, регламентирующими карбидную неоднородность, и нет методических указаний по их использованию. Описание эталонов шкал карбидной неоднородности не позволяет формализовать их в количественных показателях, наличие которых могло бы повысить точность и объективность структурного анализа.

Развитие компьютерных технологий обработки изображений позволяет микроструктуру представлять в виде комплекса количественных показателей, характеризующих структурные изменения в процессе производства материала и изготовления из него изделия [4; 5; 6]. Это открывает новые подходы к анализу микроструктур, в том числе и карбидной неоднородности. В статье описана методика количественной оценки карбидной неоднородности, основанная на программной обработке изображений микроструктур, и ее приложение применительно к структурному анализу быстрорежущих сталей.

### Количественные показатели карбидной неоднородности

Для идентификации карбидной фазы необходимо использовать изображение перетравленной микроструктуры, на которой карбиды из-за их более низкой химической активности представляются в виде светлых частиц.

В качестве меры карбидной неоднородности можно использовать следующие показатели: количество карбидных частиц ( $N$ ), расстояние между ними ( $r_c$ ), площадь сечения ( $F_i$ ) и форма каждой из них в плоскости металлографического шлифа, зафиксированная на одном снимке. Сама карбидная неоднородность может быть оценена по параметрам кривых распределения вышеуказанных показателей. Исходные показатели структуры можно определить с помощью специальных программ для компьютерной обработки изображений микроструктур, таких как Image.Pro.Plus, SUAM и других.

Для построения кривой распределения расстояния между карбидными частицами изображение микроструктуры покрывается сеткой, состоящей из  $k$ -ячеек прямоугольной формы. Тогда среднее расстояние между карбидными частицами в пределах каждой ячейки можно вычислить

$$r_c = \sqrt{\frac{F_k}{N_k}},$$

где  $F_k$  – площадь одной ячейки;  $N_k$  – количество карбидных частиц в пределах выделенной ячейки.

По совокупности значений  $r_c$  строится кривая распределения, и вычисляются ее статистические показатели. В качестве весового показателя распределения можно использовать абсолютное и относительное количество карбидных частиц в каждом интервале диапазона рассеивания, а также их суммарная абсолютная и относительная площадь.

Для выделения и размерного анализа карбидных частиц определенной формы предлагается использовать коэффициент формы, вычисляемый по формуле

$$k_\phi = \frac{P_i^2}{F_i},$$

где  $P_i$  – периметр каждого микроструктурного объекта;  $F_i$  – площадь.

Большинство карбидных частиц имеют глобулярную (эллипсоидную) форму. Площадь поверхности эллипсоидного сечения равна

$$F_э = \pi ab,$$

а длина периметра

$$P_э = 2\pi\sqrt{a^2 + b^2},$$

где  $a$  и  $b$  – главные оси эллипса

Тогда коэффициент формы эллипсоида будет равен

$$k_{\phi} = \frac{4\pi^2(a^2 + b^2)}{\pi ab} = 4\pi \left( m + \frac{1}{m} \right),$$

где  $m = \frac{a}{b}$  – отношение главных осей эллипса.

При  $m = 1$  эллипс превращается в окружность, коэффициент формы которой равен  $k_{\phi} = 4\pi \approx 12,56$ . Учитывая, что круг имеет минимальный периметр из всех возможных равновеликих фигур, наименьшее значение коэффициента формы равно  $4\pi$ . При  $m = 2$  коэффициент формы принимает значение  $10\pi$ . Задаваясь наибольшим значением  $m$ , исходя из анализа формы глобулярных частиц, можно определить предельное значение коэффициента формы.

### Методика исследования

Объектом исследования были микроструктуры закаленных быстрорежущих сталей P18, P6M5, P9K5 и P6M5K5, химический состав которых приведен в табл. 2. Травление металлографических шлифов осуществлялось 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте.

Таблица 2

Химический состав в массовых долях элемента исследуемых быстрорежущих сталей, %

Марка стали	C	Mg	Si	Cr	W	V	Co	Mo
P18	0,8	0,5	0,45	4,45	18,5	1,2	0,4	0,75
P6M5	0,85	0,45	0,42	4,4	6,2	2,1	0,35	5,2
P6M5K5	0,94	0,5	0,45	4,2	5,8	2,1	5,1	4,95
P9K5	0,96	0,45	0,5	4,4	9,45	2,54	5,76	0,76

Изображения микроструктур получали с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 при 1000-кратном увеличении. Обработка изображений осуществлялась программой Image.Pro.Plus.5.1, включающей: корректировку резкости и контрастности, калибровку в соответствии с кратностью увеличения, снятие контрастной маски, на которой карбидная фаза представлялась в виде светлых объектов. Программа рассчитывала следующие количественные характеристики микроструктуры: площадь ( $F_i$ ) и периметр ( $P_i$ ) каждого светлого объекта, а также их количество ( $N$ ). Для определения среднего расстояния между карбидными частицами вся поверхность изображения микроструктуры покрывалась сеткой из 16 прямоугольных ячеек площадью  $F_k = 750 \text{ мкм}^2$ , а площадь поверхности металлографического шлифа, зафиксированная на одном изображении при 1000-кратном увеличении, составляла  $F_{\phi} = 12000 \text{ мкм}^2$ . В результате была получена совокупность из 16 значений средних расстояний между карбидными частицами и их площадью сечений, рассчитанных в каждой ячейке. По ним определялись средние значения, среднеквадратическое отклонение и диапазон рассеивания расстояний между карбидными частицами и их площадями всей выборке.

### Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 представлены контрастные маски микроструктур исследуемых материалов, на которых в виде светлых объектов выявляется карбидная фаза, состоящая из мелких глобулярных частиц и крупных выделений неправильной формы.

Карбидная неоднородность быстрорежущих сталей прямым образом связана с легирующими тугоплавкими металлами, такими как W, V и Mo, образующими устойчивые карбиды с высокой температурой плавления. Молибден и ванадий являются аналогами

вольфрама и используются в быстрорежущих сталях для замены дефицитного вольфрама. Указанные металлы в растворенном виде могут присутствовать также в ферритной фазе. Кобальт не является карбидообразующим элементом, но положительно влияет на механические, теплофизические и технологические свойства быстрорежущих сталей. Карбиды тугоплавких металлов выделяются из жидкой фазы при кристаллизации и частично сохраняются после отжига и другой термической обработки в виде глобулярных образований [1].

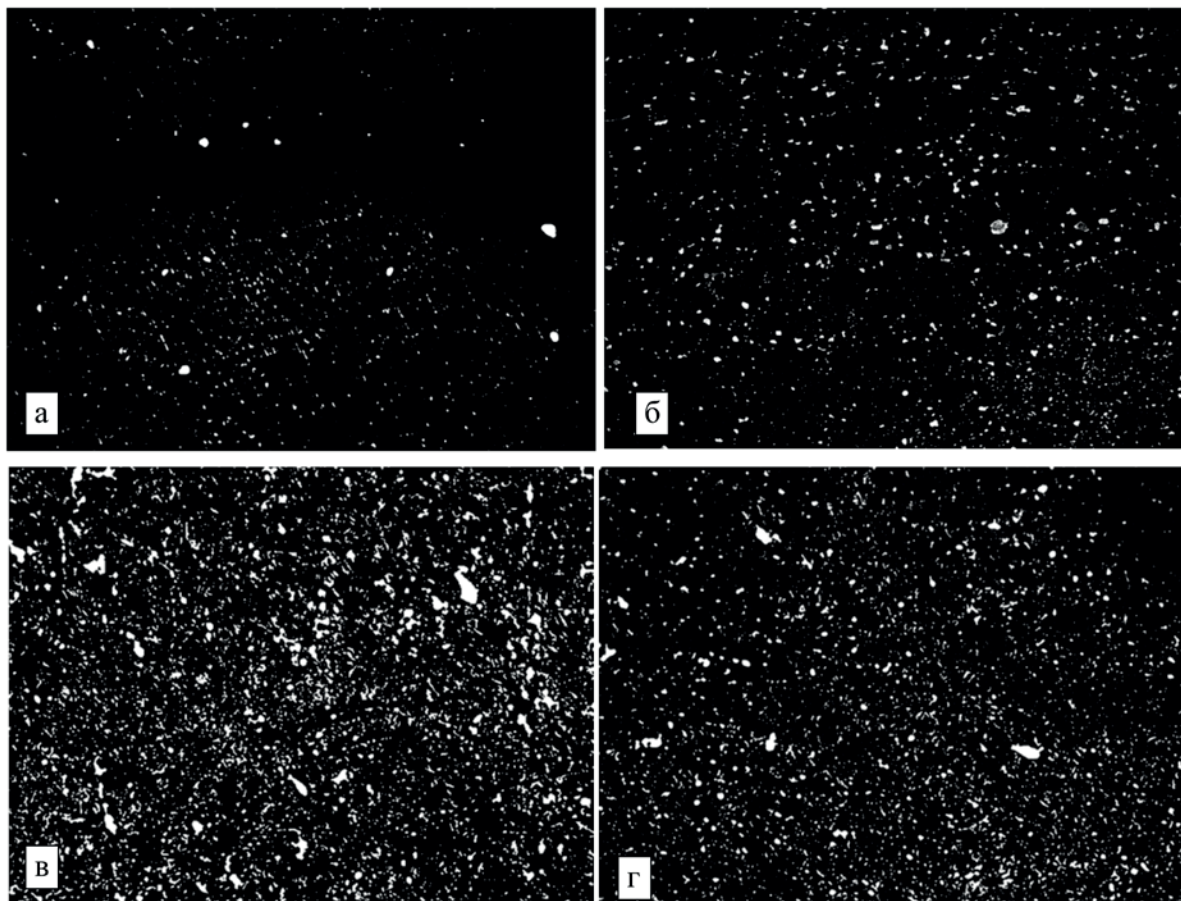


Рис. 1. Контрастные маски микроструктур быстрорежущих сталей P18 (а), P9K5 (б), P6M5 (в) и P6M5K5 (г) в закаленном состоянии

В табл. 3 приведены средние значения, среднеквадратичные отклонения и диапазон рассеивания  $\tau_c$  и  $F_i$  для разных марок быстрорежущих сталей.

Визуальный анализ микроструктур показывает, что плотность карбидных частиц в структуре стали P18 ощутимо меньше, чем в остальных. Более крупные карбидные частицы присутствуют в микроструктуре сталей P6M5 и P6M5K5. Это объясняется лучшей растворимостью карбид вольфрама в железе и подтверждается тем, что на изображениях микроструктур быстрорежущих сталей P9K5 и P18 карбиды присутствуют в виде мелких частиц на относительно большом расстоянии друг от друга. Результаты статистической обработки, приведенные в табл. 2, также подтверждают этот вывод.

Таблица 3

Результаты статистической обработки распределения карбидных частиц

Марка стали	P18	P6M5	P6M5K5	P9K5
$r_{cp}$ , мкм	3,51	2,18	2,14	2,36
$\Delta r$ , мкм	1,05-4,91	1,87-2,54	1,85-2,61	1,46-3,55
$S_r$ , мкм	1,444	0,182	0,189	0,496
$F_{cp}$ , мкм <sup>2</sup>	0,059	0,558	0,528	0,113
$\Delta F$ , мкм <sup>2</sup>	0,02-0,52	0,36-0,78	0,44-0,69	0,05-0,19
$S_F$ , мкм <sup>2</sup>	0,121	0,138	0,133	0,034

$r_{cp}$  – среднее расстояние между карбидными частицами;  
 $\Delta r$  – диапазон рассеивания между карбидными частицами;  
 $S_r$  – среднее квадратичное отклонение расстояний между карбидными частицами;  
 $F_{cp}$  – средняя площадь сечения карбидных частиц;  
 $\Delta F$  – диапазон рассеивания площадей сечений карбидных частиц;  
 $S_F$  – среднее квадратичное отклонение площадей сечений карбидных частиц.

На рис. 2 показаны распределения карбидных микрочастиц по площади сечений в плоскости шлифа, построенные в полулогарифмических координатах. Также приведены результаты их линейной аппроксимации.

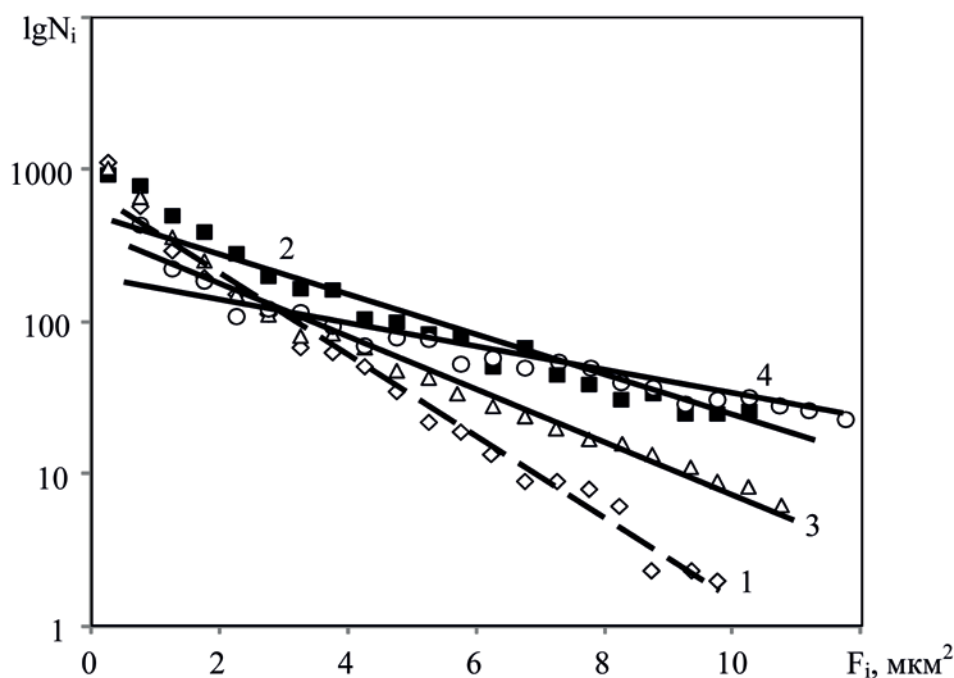


Рис. 2. Распределение карбидных микрочастиц по площади сечения:  
 1 – P18, 2 – P6M5, 3 – P6M5K5, 4 – P9K5

Карбидная неоднородность определяется количеством и характером распределения карбидных частиц по объему, а также величиной их размерного различия. Микроструктура с низким баллом карбидной неоднородности должна включать небольшое число карбидных частиц, близких по размеру и равномерно распределенных по всему объему. Таким условиям

соответствуют микроструктуры, характеризующиеся более высоким диапазоном рассеивания или среднеквадратичным отклонением расстояний между карбидными частицами, более низким диапазоном рассеивания или среднеквадратичным отклонением площадей сечений карбидов, а также меньшим количеством самих карбидных включений. Высокое значение среднеквадратичного отклонения расстояний между карбидными частицами  $S_r$  указывает на их равномерное распределение по объему, а низкое значение среднеквадратичного отклонения по площади сечений карбидных частиц  $S_F$  является результатом их размерной близости.

Сочетание всех указанных параметров структурной организации карбидов в одном материале, соответствующих наименьшей карбидной неоднородности, затруднено. Так, низкий уровень карбидной неоднородности быстрорежущей стали Р18 обеспечивается за счет небольшого числа мелких карбидов глобулярной формы, но их распределение носит неравномерный характер. Отдельные мелкие карбидные частицы образуют колонии с высокой плотностью. Микроструктура Р9К5 также характеризуется низким баллом карбидной неоднородности, но обеспечивается за счет размерной близости карбидов неправильной формы и относительно равномерным их распределением по сравнению со сталью Р18. Стали Р6М5 и Р6М5К5 отличаются более высоким баллом карбидной неоднородности, которые подтверждаются статистическими показателями распределений карбидных фаз.

Карбидная неоднородность исследуемых сталей, выполненная по стандартной методике, соответствует второму баллу по шкале 2. При этом компьютерная металлография выявляет особенность структурной организации карбидной фазы. Так, характер распределения карбидных частиц по площади позволяет выделить две области. Мелкие карбидные частицы до  $3,0 \text{ мкм}^2$  обеспечивают дисперсионное упрочнение, с повышением плотности которых возрастают эксплуатационные свойства быстрорежущих сталей. Карбиды более крупных размеров могут играть роль концентраторов напряжений микромасштабного уровня.

### Заключение

1. Стандартные методы определения карбидной неоднородности основаны на визуальном сравнении микроструктуры углеродистых и легированных сталей с эталоном и характеризуются низкой точностью и субъективностью.
2. Разработаны количественные показатели карбидной неоднородности, в частности, плотность карбидных включений на единичной площади поверхности металлографического шлифа и расстояние между ними, а также методика их определения с помощью компьютерной металлографии.
3. Выполнен анализ карбидной неоднородности различных марок быстрорежущих сталей, показывающих простоту и эффективность предлагаемых методик.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – 5-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
2. Уманский, Я. С. Физика металлов. Атомное строение металлов и сплавов / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков. – М.: Атомиздат, 1978. – 353 с.
3. ГОСТ 19265-73 Прутки и полосы из быстрорежущей стали. – М.: ИПК Издательство стандартов. 2002.
4. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / V. A. Kim, V. V. Petrov, A. V. Butin, I. V. Belova, A. A. Shpileva // Metal Science and Heat Treatment. – Vol. 52. – Nos. 3-4. – 2010. – p. 163-165.
5. Статистическая оценка количественной металлографии / В. А. Ким, Р. В. Евдокимова, С. В. Золотарева, А. А. Попкова, М. Йошида // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1 (14). – С. 76-82.
6. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золотарева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 4. – С. 43-46.



**Якимов В.И., Евстигнеев А.И., Захарова Е.В., Куриный В.В., Муравьев В.И.**  
**V. I. Yakimov, A. I. Evstigneev, E. V. Zaharova, V. V. Kuriniy, V. I. Muravyev**

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

**IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF CAST BLANKS**

**Якимов Виктор Иванович** – доктор технических наук, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю. А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr. Yakimov Victor I.** – Doctor of Engineering, JSCo «Komsomolsk-on-Amur Aircraft Production Association named after Yu. A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, советник при ректоре Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: msf@knastu.ru.

**Mr. Evstigneev Alexey I.** – Doctor of Engineering, Professor, Honored Master of Sciences, Rector's Adviser, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: msf@knastu.ru.

**Захарова Елена Викторовна** – инженер-технолог, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.

**Ms. Zaharova Elena V.** – industrial engineer, JSCo «Komsomolsk-on-Amur Aircraft Production Association named after Yu.A. Gagarin» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 52-63-17.

**Куриный Владислав Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru

**Mr. Kuriniy Vladislav V.** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering and Metallurgy Department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8-962-298-52-21. E-mail: VMuravyev@mail.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8-962-298-52-21. E-mail: VMuravyev@mail.ru.

**Аннотация.** В статье описываются результаты исследований по повышению механических и эксплуатационных свойств литых заготовок.

**Summary.** This article describes the results of researches on improvement of mechanical and operational properties of cast blanks.

**Ключевые слова:** литые заготовки, форма, химический состав, AL-сплавы, газостатирование.

**Key words:** cast blanks, configuration, chemical composition, AL-alloy, nitration.

УДК 621.74:621.74.043:669.715

Важнейшей задачей, стоящей перед работниками различных отраслей народного хозяйства, является всемерное сокращение норм расхода материалов при изготовлении изделий. Особенно большие резервы экономии металла могут быть реализованы при широком внедрении прогрессивной технологии производства изделий по схеме литье-штамповка. В

первую очередь при внедрении прогрессивной технологии обработки металлов давлением необходимо решить задачу подготовки заготовок, которые должны иметь стабильный вес и геометрию, близкую к исходному профилю для штамповки [1]. Применение литых заготовок, имеющих оптимальную форму с точки зрения последующей деформации, обеспечивает существенную экономию металла в сравнении с общепринятой технологической схемой, предусматривающей выплавку слитков, получение деформированной заготовки и окончательную штамповку полуфабрикатов. При этом сокращаются транспортные операции, уменьшается количество нагревов и переходов при штамповке.

Улучшение эксплуатационных характеристик литой детали достигается главным образом в результате повышения физической однородности металла, сокращения макро-, микро- и субмикроскопических дефектов. Один из путей повышения качества отливок – использование физико-механических методов воздействия на расплав, позволяющих повысить механические и эксплуатационные свойства отливок.

Ряд работ [2-6] посвящён вопросу эффективной штамповки литых заготовок с целью улучшения эксплуатационных свойств.

Из проведенных исследований выявлено: повышается стойкость штампов по сравнению со штамповкой прессованных заготовок [2-4]; расход металла на один моторокомплект уменьшается более чем в 2 раза, стоимость – в 4 раза, КИМ увеличивается в 3...5 раз [5]; допрессовка алюминиевых отливок на 20 % увеличивает предел текучести на 65 % и предел прочности на 50 %; исходная заготовка удешевляется на 12...15 % [6].

Исследования, проведённые на «КнААПО» (г. Комсомольск-на-Амуре) [7-11], по использованию отходов сплава АК4-1 кузнечного производства путём литья в кокиль и последующей штамповки со степенью деформации 20...30 % показали:

- штамповка литой заготовки значительно повышает её механические свойства ( $\sigma_b = 400$  МПа,  $\delta = 7,5$  %) по сравнению с литой заготовкой ( $\sigma_b = 205$  МПа,  $\delta = 4,0$  %);
- среднее значение  $\sigma_b$  у штамповок, полученных из прессованных и литых заготовок, примерно одинаковы (400 МПа), а  $\delta$  для литейно-штампованной заготовки (7,5 %) несколько выше по сравнению со штамповкой из прессованной заготовки (6 %);
- ширина облоя штамповки, полученного из литой заготовки, уменьшается в 8...10 раз, толщина – в 4...6 раз, что увеличивает коэффициент использования материала с 0,3 до 0,7 %;
- запас прочности деталей, изготовленных методом литьё-штамповка, на 5...10 % больше, чем запас прочности деталей, изготовленных по серийной технологии.

Работа [12] посвящена получению литых локально-деформированных деталей повышенного ресурса. Сущность процесса заключается в получении отливки сложной конфигурации с необрабатываемыми поверхностями, поднутрениями и вырезами в нерасчётных сечениях детали. Опасные сечения детали, имеющие конструктивные концентраторы напряжений, оформляются специальными технологическими припусками и перемычками, чтобы обеспечить возможность локальной штамповки с заданной степенью деформации – 35...40 %. В результате проведённой работы выявлено, что механические свойства деформированной зоны увеличиваются на 25...40 %, и по выносливости эта зона намного превосходит литую.

Если методом литья-штамповки можно повысить надёжность деталей, имеющих довольно простую форму, то надёжность и качество фасонных отливок можно повысить путём высокотемпературной газостатической обработки (ВГО) [13-17].

ВГО – это эффективный способ устранения внутренних усадочных пор в отливках. Устранение внутренней пористости в отливках приводит к получению металлографически выявляемой бездефектной структуры, а также существенному повышению механических свойств металла.

Повышение плотности литого материала в результате ВГО способствует увеличению не только механических, но и целого ряда специальных свойств: свариваемости, термоусталости, обрабатываемости резанием, вакуумной плотности, равномерности химической обработки.

ВГО открывает эффективный путь повышения надёжности, эксплуатационных и ресурсных характеристик фасонных отливок из различных металлов и сплавов, недостижимый ни при различных методах литья, ни при использовании последующей термической обработки.

На ОАО «КНААПО» совместно с ОАО «УМПО» (г. Уфа) проведена работа по выявлению влияния газостатирования отливок из алюминиевых сплавов и с ОАО «Композит» (г. Королев) – по выявлению влияния газостатирования отливок из стали ВНЛ-3.

Опытные работы подтвердили целесообразность обработки отливок в газостатах. Отливки после газостатирования отклонений по геометрии не имели; временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ) имело небольшое увеличение, а относительное удлинение ( $\delta$ ) увеличилось в 2...3 раза. Все внутренние дефекты отливок вышли на поверхность и были легко исправлены подваркой, а если был припуск – то удалялись при механической обработке отливок.

Газостатирование повышает надёжность деталей и эксплуатационные свойства, полностью исключает случаи попадания деталей с внутренними дефектами на изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Якимов, В. И. Разработка и внедрение высокоэффективных технологических процессов изготовления отливок из алюминиевых и магниевых сплавов в авиастроении: дис. ... д-ра техн. наук / Якимов Виктор Иванович. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – 409 с.
2. Курочкина, М. А. Изготовление латунных деталей методом литье-штамповка / М. А. Курочкина // Литейное производство. – 1981. – № 11. – С. 37.
3. Процесс «Автофорж» / Б. Л. Кузнецов и др. // Литейное производство. – 1978. – № 6. – С. 29.
4. Исследование качества штамповок, полученных из литых заготовок сплавов ЭИ698 и ЭП742 / М. С. Подольский и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 12. – С. 3.
5. Изготовление направляющих лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов литьем с доштамповкой / Б. Х. Ланда и др. // Авиационная промышленность. – 1979. – № 3. – С. 16.
6. Штамповка деталей автомобилей из непрерывнолитых заготовок / Ю. Н. Сергеев и др. // Автомобильная промышленность. – 1983. – № 6. – С. 30-31.
7. Литье-штамповка деталей из алюминиевого сплава АК4-1 / В. А. Матысик и др. // Литейное производство. – 1982. – № 5. – С. 33.
8. Матысик, В. А. Литье-штамповка деталей из алюминиевого сплава АК4-1 / В. А. Матысик, В. П. Паниван, В. И. Якимов // XXXII Всесоюзная науч.-техн. конф. литейщиков. – Улан-Удэ, 1982. – С. 55.
9. Матысик, В. А. Литье-штамповка деталей из алюминиевого сплава АК4-1 / В. А. Матысик, В. И. Якимов // Авиационная промышленность. Приложение №5. – 1983. – С. 12.
10. Исследование совмещённых технологических процессов литье-штамповка для изготовления деталей из отходов деформируемых алюминиевых сплавов / В. И. Якимов и др. // Современные технологии в машиностроении: III Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза, 2000. – С. 38-41.
11. Якимов, В. И. Изготовление деталей из отходов деформируемых алюминиевых сплавов методом литье-штамповка / В. И. Якимов, В. И. Муравьев, А. В. Якимов // Вестник КНАГТУ. Вып. 2. Прогрессивные технологии в машиностроении. Сб. 1. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре, 2000. – С. 52-56.
12. Дукин, В. П. Получение литых локально-деформированных деталей повышенного ресурса из сплава ВАЛ10 / В. П. Дукин // Авиационная промышленность. – 1984. – № 9. – С. 54-56.
13. Воробьева, И. Ф. Высокотемпературная газостатическая обработка литейных алюминиевых сплавов / И. Ф. Воробьева, Б. А. Копелиович, С. С. Хаюров // Авиационная промышленность. – 1988. – № 7. – С. 63.
14. Влияние высокотемпературной газостатической обработки на качество крупногабаритных отливок из алюминиевых сплавов / Б. А. Копелиович и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 10. – С. 61-62.
15. Влияние высокотемпературной газостатической обработки на газосодержание отливок из титановых сплавов / Е. К. Введенская и др. // Авиационная промышленность. – 1989. – № 5. – С. 67.
16. Влияние режимов газостатического прессования на свойства стальных отливок / А. С. Клещев и др. // Авиационная промышленность. – 1986. – № 5. – С. 68.
17. Белов, А. Ф. Повышение качества, надёжности фасонных отливок путём высокотемпературной газостатической обработки / А. Ф. Белов, С. С. Хаюров // Авиационная промышленность. – 1986. – № 4. – С. 45-47.

**Францев М. Э.**  
**M. E. Frantsev**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАВУЧЕСТИ СУДНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА КРЕНОВАНИЯ**

**RECOVERY OF THE THEORETICAL ELEMENTS OF VESSEL BUOYANCY  
WHILE PROCESSING THE RESULTS OF AN INCLINING EXPERIMENT  
WITH THE USE OF NUMERICAL METHODS**

**Францев Михаил Эрнстович** – кандидат технических наук, директор инжиниринговой компании «АОЗТ «Нептун-Судомонтаж» (Россия); 141703, Россия, Долгопрудный; тел. +7(903)7173125. E-mail: gepard629@yandex.ru.

**Frantsev Mikhail Ernstovich** – PhD in Engineering; Director of Engineering Company «JSC «Neptun-Sudomontazh» (Russia); 141703, Russia, Dolgoprudny; tel. +7(903)7173125. E-mail: gepard629@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрен пример восстановления теоретических элементов плавучести пассажирского судна проекта 305, подводная часть которого при переоборудовании не изменялась, численными методами при обработке результатов опыта кренования. Во всех расчётах, кроме расчёта абсциссы центра величины, аппроксимирующая функция была задана в виде степенной функции. Для сравнения с результатами, полученными с помощью численных методов, элементы плавучести были определены традиционными методами теории корабля по теоретическому чертежу. Расхождения в расчётах составили не более 0,5 %, а трудоёмкость выполнения расчётов численными методами оказалась существенно ниже.

**Summary.** The paper considers the recovery of the theoretical elements of the passenger ship buoyancy of the project 305. The underwater part of the ship was not changed when retrofitting, using numerical methods in processing the results of an inclining experiment. In all the calculations, except for center of buoyancy abscissa, the approximating function was given in the form of an exponential function. To compare with the results, obtained by the numerical methods, buoyancy elements were identified by the conventional methods of the ship theory on the theoretical drawing. The differences in the calculations were no more than 0.5 %, and the complexity of performing calculations using the numerical methods was proved to be significantly lower.

**Ключевые слова:** теоретические элементы плавучести, опыт кренования, численные методы, аппроксимация, переоборудование судов.

**Key words:** theoretical elements of buoyancy, inclining experiment, numerical methods, approximation, vessel retrofitting.

УДК 629.12.001

**Введение**

Последние десятилетия характеризуются резким уменьшением объёмов строительства новых судов. Судовладельцы, стремясь эффективно, с их точки зрения, использовать имеющийся флот, пытаются адаптировать его к требованиям нового времени. Адаптация имеющегося флота, как правило, ведётся путём его переоборудования. В ряде случаев целью переоборудования является изменение назначения судна. Можно привести множество примеров переоборудования сухогрузов в танкеры, судов-снабженцев – в плавучие рестораны, грузовых судов – в пассажирские и т.п. Другим направлением является усиление при переоборудовании определённых качеств судна. Это может быть, например, повышение уровня ком-

форта пассажирского судна за счёт увеличения вместимости определённых пассажирских помещений с одновременным изменением их компоновки.

Переоборудование любого судна – это творческий, технически сложный и весьма кропотливый процесс, главным девизом которого должен быть девиз «Не навреди». Однако часто встречаются суда, ставшие результатом переоборудования по принципу «разрушим до основания, а затем...». Введён даже официальный термин – «постройка с использованием элементов существующего судна». При этом от переоборудуемого судна может оставаться лишь часть килевой секции. За новыми очертаниями судна порой с трудом угадываются приметы его серийного «прародителя». И не всегда столь глубокие изменения оправданны. Часто большинство эксплуатационных качеств переоборудованного судна не претерпевает улучшения пропорционально масштабам внесённых в его конструкцию изменений. А некоторые важные свойства судна, такие как остойчивость, непотопляемость, мореходность, ходкость и управляемость, после переоборудования значительно ухудшаются. Тому есть достаточно примеров.

Возможно, главной причиной этого является отсутствие должной глубины в концептуальной проработке проекта переоборудования судна. Кажущаяся простота переоборудования, обусловленная, в первую очередь, самим фактом физического существования судна, а также возможностью быстрого преобразования его отдельных элементов, приводит к тому, что судовладелец, пытаясь заставить судно решать другие, ранее несвойственные ему задачи, разрабатывает концепцию его переоборудования самостоятельно. На начальном этапе разработки проекта, когда цена проектной ошибки особенно высока, к проектированию с правом совещательного голоса привлекаются в лучшем случае наёмные консультанты из числа плавсостава, а то и представителей рабочих специальностей. И только на завершающих стадиях проектирования, когда проект переоборудования необходимо оформлять для согласования с Российским Речным Регистром (РРР), к его разработке привлекаются специализированные проектные организации и дипломированные специалисты соответствующего профиля. Можно предположить, что процесс этот будет продолжаться и в дальнейшем, по мере смены собственников существующих судов.

### **Постановка задачи**

Дополнительную сложность процессу переоборудования судна придаёт минимальное наличие, а в ряде случаев полное отсутствие его проектной и/или эксплуатационной документации. Большинство переоборудуемых судов построено более полувека назад. За столь долгий срок КБ и судостроительные предприятия, создававшие судно, исчезли вместе с его проектной документацией. Эксплуатационная документация судна из-за многократной смены его владельцев, как правило, утрачена полностью или частично. В лучшем случае она многократно подвергалась перекопированию и потому содержит существенные искажения.

Всё это приводит к тому, что в ряде случаев специалист или проектная организация, выполняющие завершающие стадии проекта переоборудования судна, в том числе подготавливающие проектную документацию для согласования с РРР, не располагают информацией об исходных качествах судна, и поэтому не могут оценить их изменения, произошедшие в процессе его переоборудования. Отсутствие такой информации часто приводит к проектным ошибкам. Цена этих ошибок, особенно когда они касаются таких важных эксплуатационных качеств судна, как его остойчивость, может оказаться неприемлемо высокой. Вследствие этого по общему правилу РРР требует проведения опыта кренования для судов после переоборудования. При этом результаты опыта должны быть внесены в Информацию об остойчивости и непотопляемости судна, а проект переоборудования должен быть по ним откорректирован. Поэтому опыт кренования является одним из ключевых моментов переоборудования судна, а его результаты трудно переоценить. В основе оценки результатов опыта лежит информация о теоретических элементах плавучести переоборудованного судна. Без этой информации объективная оценка результатов опыта невозможна.

В данной статье рассмотрен пример восстановления численными методами теоретических элементов плавучести пассажирского судна проекта 305, подводная часть которого при переоборудовании не изменялась, при обработке результатов опыта кренования.

В соответствии с методикой, изложенной в [1], положение центра тяжести судна при обработке результатов опыта кренования определяется следующим образом. Сначала определяется водоизмещение судна:

$$D = \gamma V ,$$

где  $D$  – весовое водоизмещение, т;  $\gamma$  – удельный вес пресной воды, т/м<sup>3</sup>;  $V$  – объёмное водоизмещение, м<sup>3</sup>.

Апplikата центра тяжести судна при дифференте  $> 0,005L$  (рассматриваемый случай), где  $L$  – расчётная длина судна, определяется по формуле

$$z_g = z_c + (r - h) \cos \psi ,$$

где  $z_c$  – апplikата центра величины, м;  $r$  – малый метацентрический радиус, м;  $h$  – малая метацентрическая высота, м;  $\psi$  – угол дифферента, град.

Абсцисса центра тяжести судна при дифференте  $> 0,005L$  определяется по формуле

$$x_g = x_c - (r - h) \sin \psi ,$$

где  $x_c$  – абсцисса центра величины, м.

Малая метацентрическая высота определяется в результате опыта. Теоретические элементы плавучести  $D$ ,  $r$ ,  $z_c$ ,  $x_c$  определяются любым достаточно точным способом при соответствующих осадках носом и кормой [1].

#### Решение

При проведении опыта кренования переоборудованного судна проекта 305 в пресной воде была измерена высота надводного борта в носу, корме и на миделе по обоим бортам. По шкалам осадок, там, где они имелись, была определена осадка судна. Полученные значения осадок указывали на то, что в момент проведения опыта кренования переоборудованное судно имеет существенно большее водоизмещение, чем серийное пассажирское судно проекта 305.

Методы определения элементов плавучести в теории корабля хорошо известны, и здесь останавливаться на них нет необходимости. Однако для их определения необходимо наличие теоретического чертежа судна.

В связи с тем, что суда проекта 305 проектировались и строились за рубежом (Венгрия) более полувека назад, у разработчика проекта переоборудования на момент проведения опыта кренования отсутствовали исходные проектные и эксплуатационные документы переоборудуемого судна, включая теоретический чертёж.

Поэтому для получения необходимой информации об отдельных значениях осадки и водоизмещения, а также других теоретических элементов плавучести проекта 305 использовался Справочник по серийным транспортным судам [2]. В нём были приведены значения осадки для нескольких значений водоизмещения. Кроме того, там приводились значения абсцисс и апplikат центра величины судна, а также значения малого метацентрического радиуса для двух значений водоизмещения, которые были получены по результатам опыта кренования головного судна проекта 305. Значения водоизмещения для осадки и других теоретических элементов плавучести между собой не совпадали.

Для восстановления теоретических элементов плавучести, необходимых при обработке результатов опыта кренования, было решено использовать численные методы в соответствии с принципами, изложенными в [3].

В качестве единой независимой переменной при решении рассматриваемой задачи может рассматриваться осадка судна. Эта величина объективно отражается в соответствующую

щей справочной литературе [2], а также может быть получена измерением. Логико-физический смысл применения независимой переменной заключается в возможности соотнесения различных величин теоретических элементов плавучести судна с его осадкой. Обозначим независимую переменную как  $T$ .

Множества значений теоретических элементов плавучести, определяемых на заданном интервале, сопоставленных множеству значений одной и той же независимой переменной, определяемой на этом же интервале, пригодны для проектной аппроксимации, а также для исследования динамики изменения функции методами регрессионного анализа. Все теоретические элементы плавучести из области допустимых значений сбалансированы между собой, т.к. описывают качества одного и того же корпуса.

Представление зависимостей теоретических элементов плавучести в виде математических функций позволяет применить математические методы для их определения.

Таким образом, на рассматриваемом интервале между минимальной и максимальной осадками значения величин теоретических элементов плавучести  $D, r, z_c, x_c$  могут рассматриваться как значения функций, имеющих общий аргумент – осадку судна  $T$ .

Представим базу данных теоретических элементов плавучести рассматриваемого судна в интересующем нас размерном интервале в виде множеств, элементами которых являются их значения.

Так как формирование выборки значений, относящихся к заданному размерному интервалу, имеет случайный характер (они являются результатами несвязных опытов), становится возможным проведение необходимых расчётов и получение выводов чисто математическими средствами в рамках регрессионной модели.

Случайные величины, полученные методом случайной выборки из открытых источников, неизбежно содержат случайные ошибки. Случайные ошибки определяются большим числом факторов, которые не могут быть устранены или в полной мере учтены при обработке результатов. Они имеют случайный, несистематический характер, дают отклонения от истинного значения в ту и другую стороны.

Таким образом, мы приходим к задаче вычисления приближённых значений функции при любом значении аргумента на основе имеющихся табличных данных. Эта задача решается путём приближённой замены функции  $f(x)$  более простой функцией  $\varphi(x)$ , которую можно вычислять при любом значении аргумента  $x$  в заданном интервале его изменения. Введённую функцию можно использовать не только для приближённого определения численных значений  $f(x)$ , но и для проведения аналитических расчётов при теоретическом исследовании модели. Приближение функции  $f(x)$  более простой функцией  $\varphi(x)$  называется аппроксимацией. Аппроксимация, при которой приближение строится на заданном дискретном множестве точек  $\{x_i\}$ , называется точечной.

Для получения точечного среднеквадратичного приближения функции  $y = f(x)$ , заданной таблично, аппроксимирующую функцию  $\varphi(x)$  строят из условия минимума величины:

$$S = \sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2,$$

где  $y_i$  – значения функции  $f(x)$  в точках  $x_i$ .

Аппроксимация данных с учётом их частотных параметров относится к задачам регрессии. Задачей регрессионного анализа является подбор формул, наилучшим образом описывающих полученные данные.

Рассматриваемый интервал изменения осадки переоборудованного судна составил более 26 % от её расчётного значения при полном водоизмещении проекта 305. При таком интервале изменения осадки в расчётах теоретических элементов плавучести не было возможности использовать гипотезу прямолинейного судна и, соответственно, применять линей-

ную аппроксимацию имеющихся значений. Поэтому во всех расчётах, кроме расчёта абсциссы центра величины, применялось задание аппроксимирующей функции в виде степенной функции:

$$y = ax^b.$$

Таким образом, для идентификации зависимостей теоретических элементов плавучести судна от его осадки необходимо сформировать и сопоставить дискретные множества значений этих характеристик и аппроксимировать их по степенному закону в заданном интервале значений каждой из величин. Используя аппроксимирующие функции, мы можем получить достаточно достоверные зависимости, позволяющие определять теоретические элементы плавучести в первом приближении достаточно эффективно.

Для выполнения расчётов использовалась программа Microsoft Excel. Расчёты выполнялись на сайте <https://office.live.com>.

Сначала была вычислена аппроксимирующая функция, отражающая изменение осадки по интервалу водоизмещения, и был построен её график (см. рис. 1). Аппроксимирующая функция изменения осадки имеет вид

$$T = 0,0034D^{0,8987}.$$

где  $T$  – осадка, м.

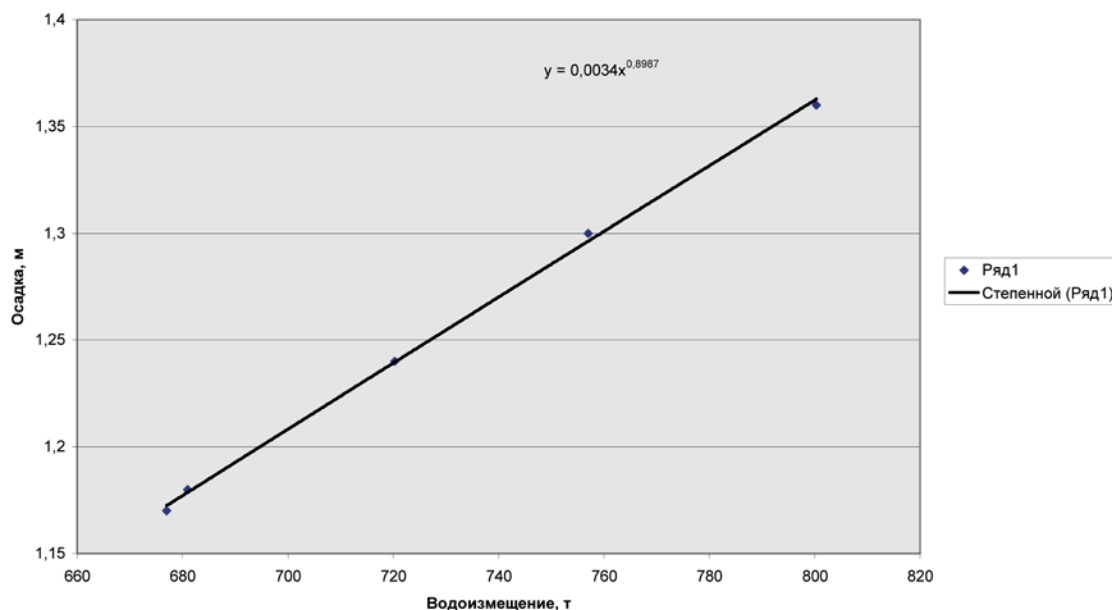


Рис. 1. Изменение осадки по интервалу водоизмещения

Далее была вычислена аппроксимирующая функция грузового размера судна, был построен её график (см. рис. 2). Аппроксимирующая функция грузового размера судна имеет вид

$$D = 567,28T^{1,1115}.$$

Вычисление аппроксимирующей функции грузового размера судна проекта 305 по интервалу осадок позволило по значениям осадки, измеренным при проведении опыта кренования, получить значение водоизмещения переоборудованного судна в момент проведения опыта. Оно превышало полное водоизмещение по проекту 305 на 11,8 % и превышало полное водоизмещение по проекту переоборудования на 2,7 %.

Следующим этапом стало вычисление аппроксимирующей функции, отражающей изменение абсциссы центра величины по интервалу водоизмещения (см. рис. 3). Она имеет вид

$$x_c = -0,0021D + 1,32.$$

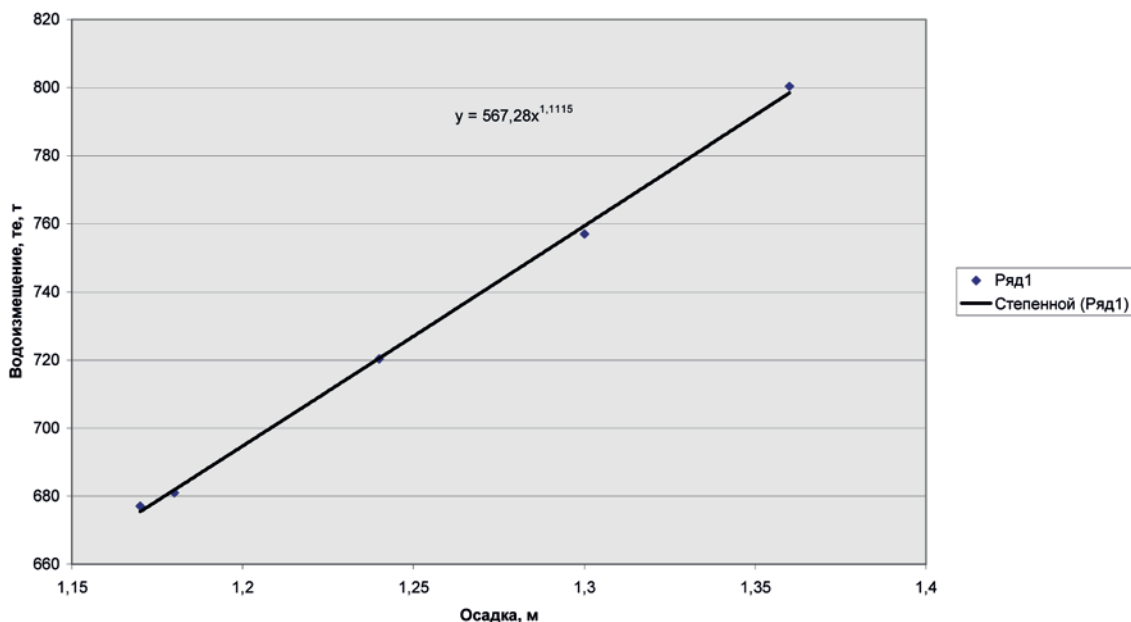


Рис. 2. Грузовой размер

Аппроксимирующая функция, отражающая изменение аппликаты центра величины по интервалу водоизмещения (см. рис. 4), имеет вид

$$z_c = 0,0011D^{0,9745}.$$

В дополнение к аппроксимирующим функциям, определяющим положение центра величины, была вычислена аппроксимирующая функция, отражающая изменение малого метацентрического радиуса по интервалу водоизмещения (см. рис. 5), которая имеет вид

$$r = 979,27D^{-0,7399}.$$

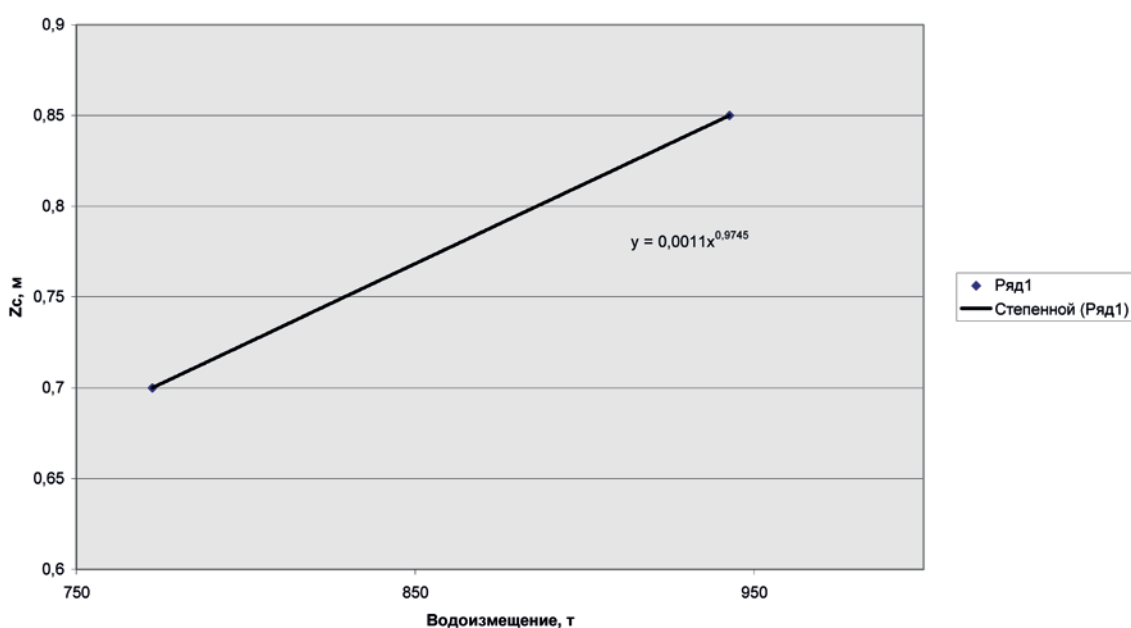


Рис. 3. Изменение аппликаты центра величины по интервалу водоизмещения

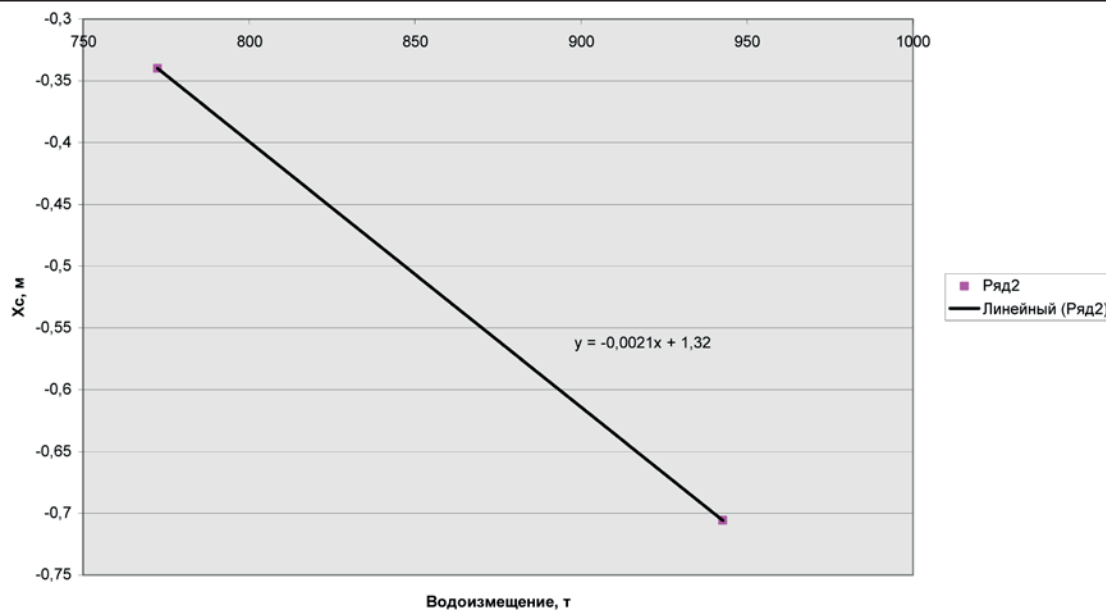


Рис. 4. Изменение абсциссы центра величины по интервалу водоизмещения

**Выводы, заключение**

Характер всех полученных графиков аппроксимирующих функций соответствовал конфигурации соответствующих участков кривых элементов плавучести, приведённых в литературе по теории корабля, например в [4]. Поэтому графики были признаны работоспособными для последующих расчётов.

По аппроксимирующим функциям теоретических элементов плавучести были определены их значения, соответствующие водоизмещению переоборудованного судна в момент проведения опыта кренования, для расчётов положения центра тяжести в соответствии с методикой [1]. Результаты опыта кренования были признаны достоверными проектантом и экспертом РРР.

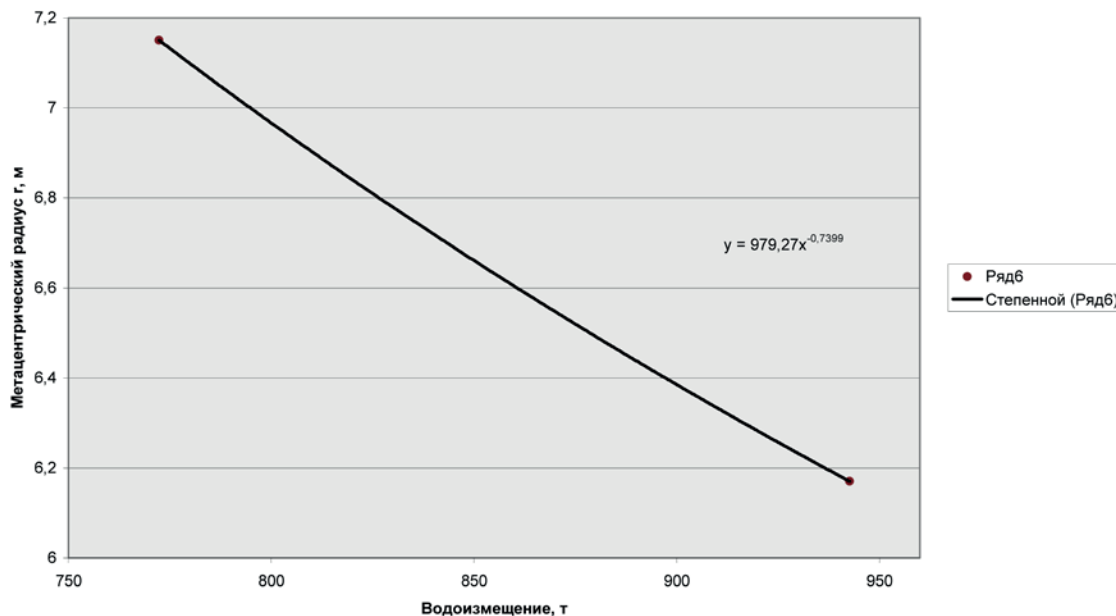


Рис. 5. Изменение малого метацентрического радиуса по интервалу водоизмещения



Уже после окончания обработки результатов опыта кренования численными методами в распоряжении автора статьи и его коллег оказалась светокопия теоретического чертежа проекта 305, к сожалению, достаточно низкого качества. Для сравнения с результатами, полученными численными методами, по теоретическому чертежу элементы плавучести были определены традиционными методами теории корабля. Расхождения в расчётах составили не более 0,5 %, а трудоёмкость выполнения расчётов численными методами оказалась меньше почти на порядок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Российский Речной Регистр. Правила. В 4 т. Т. 2. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания. – М.: [б. и.], 2008. – 400 с.
2. Справочник по серийным транспортным судам. ЦБНТИ МРФ. В 11 т. Т. 1. – М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
3. Францев, М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов при помощи анализа баз данных / М. Э. Францев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – 2011. – № 3. – С. 37-46.
4. Алферьев, М. Я. Теория корабля / М. Я. Алферьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1972. – 448 с.