

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА  
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

**Колыхалов Д. Г.**  
**D. G. Kolykhalov**

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF THE PROCESS OF FORMING TUBULAR PARTS OF AIRBORN VEHICLES**

**Колыхалов Дмитрий Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 89622868966. E-mail: dgk.knastu@mail.ru.

**Mr. Dmitry G. Kolykhalov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aviation Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina Av.; +7 962 2868966. E-mail: dgk.knastu@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам конечно-элементного моделирования формообразования трубчатых заготовок с использованием программного продукта QForm 2D/3D, которые помогают оценить распределение интенсивности напряжений в процессе деформирования, а также степень деформации, при которой образуется трещина в условиях данной механической схемы деформации.

**Summary.** The paper deals with the issue of finite element simulation and analysis of the process of forming tubular blanks using the QForm 2D/3D software, to help one in assessing the intensity distribution of stresses during the deformation process, and the degree of strain which may lead to cracks under conditions of this type of deformation pattern.

**Ключевые слова:** конечно-элементное моделирование, обжим, раздача, трубчатые заготовки, пластическая деформация.

**Key words:** finite-element simulation, crimping, expanding, tubular blanks, plastic deformation.

УДК 621.913

Современный зарубежный рынок программ конечно-элементного анализа процессов кузнечно-штамповочной промышленности представлен не так широко. В качестве примеров можно привести лишь несколько программ:

– **VeraCAD** (разработчик – Eratz Ingenieur Büro (Германия)) – простая в использовании система автоматизированного проектирования, предназначенная для построения калибров и расчета параметров технологического процесса вальцовки, имеется возможность экспорта чертежей и трехмерных моделей инструментов;

– **Matilda** (разработчик – компания GMS Bernau (Германия)) – программа, позволяющая моделировать термообработку и формировать микроструктуру;

– **THERMPROF** (разработчик – компания АВР (Германия)) – программа, позволяющая рассчитывать режим индукционного нагрева заготовки по ее параметрам, необходимую производительность и время нагрева в индукторе;

– **QForm 2D/3D** (разработчик – фирма «КванторФорм» (Россия)) – программный комплекс для моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением, основанного на методе конечных элементов.

Особый интерес представляет отечественная программа QForm 2D/3D, поскольку она отвечает самым высоким требованиям в области моделирования процессов кузнечно-штамповочной промышленности. Моделирование легко выполняется для всей технологиче-

ской цепочки, состоящей из таких операций, как управляемый нагрев, формоизменение, обрезка и охлаждение.

Помимо вычислений температуры, напряжений и деформаций, программа может рассчитывать процессы рекристаллизации и изменения размера зерен. Возможен расчет операций для предсказания свойств поковки. Программа легка в освоении и не требует специальной подготовки, кроме практического опыта в области технологии обработки давлением, что обеспечивает снижение временных затрат на разработку новых и оптимизацию существующих технологических процессов. QForm легко может применяться на средних и малых предприятиях благодаря простому интерфейсу, быстрой подготовке исходных данных и полностью автоматическому расчету.

С точки зрения российских пользователей, программа QForm является удобным инструментом моделирования процессовковки и штамповки, что обеспечивает быстрое возвращение инвестиций путем ускорения проектирования технологий и сокращения издержек производства. Программа QForm постоянно наращивает возможности моделирования и имеет конкурентоспособные преимущества. Все совершенствования, новые возможности и модули расчета программы направлены на экономию затрат предприятий, которые ее используют [1].

Программа QForm позволяет моделировать процессы обжима и раздачи трубчатых заготовок в специализированных оснастках. Для проведения моделирования необходимо подготовить 3D-модели штампов и трубчатых заготовок. Процесс моделирования можно провести практически в любой имеющейся системе твердотельного моделирования. В качестве самых распространенных систем твердотельного моделирования можно указать следующие системы:

- NX (ранее Unigraphics или UG) – флагманская CAD/CAM/CAE – система от компании Siemens PLM Software. Программа использует ядро геометрического моделирования Parasolid;
- CATIA – система автоматизированного проектирования (САПР) французской фирмы Dassault Systèmes;
- Pro/ENGINEER – система автоматизированного проектирования от Parametric Technology Corporation;
- T-FLEX CAD – САПР, разработанная российской компанией «Топ Системы» с возможностями параметрического моделирования. Система работает на основе геометрического ядра Parasolid.

Используем систему NX для разработки твердотельных моделей оснастки и трубчатых заготовок (см. рис.1 – 5).

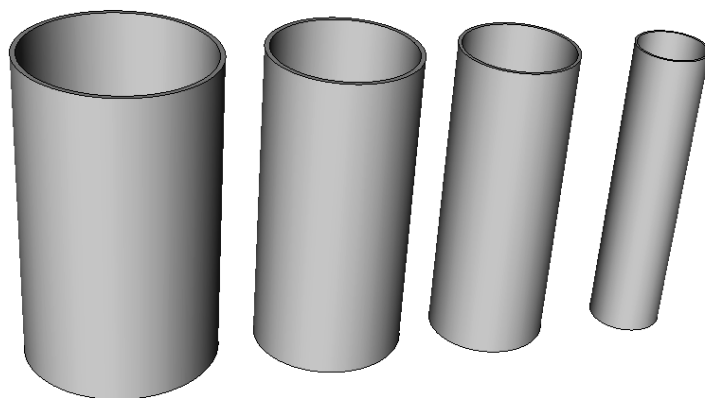


Рис. 1. Твердотельные модели трубчатых заготовок различных диаметров и толщин

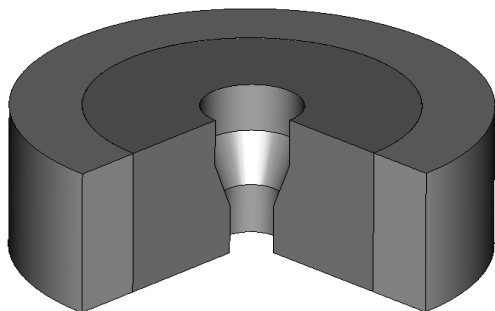


Рис. 2. 3D-параметрическая модель оснастки для обжима

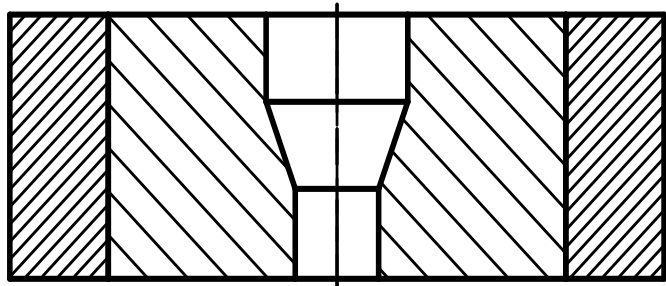


Рис. 3. 2D-параметрическая модель оснастки для обжима

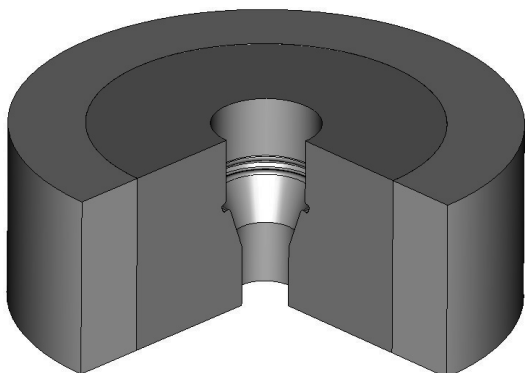


Рис. 4. 3D-параметрическая модель оснастки для обжима с канавкой

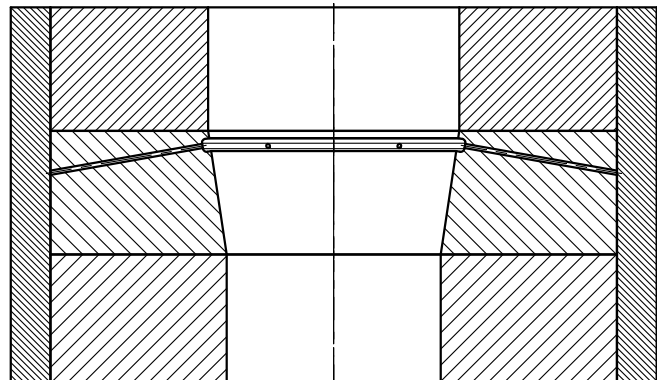


Рис. 5. 2D-параметрическая модель оснастки для обжима с канавкой

Разработанные твердотельные модели необходимо экспортировать в формат STEP A203/214 3D (\*.stp, \*.step) и в ходе дальнейшей работы импортировать в систему QForm.

Несмотря на то, что программа QForm основана на методе конечных элементов (ядро системы), в ней нет никакого жесткого разделения системы на препроцессоры и постпроцессоры. Визуализация процессов формоизменения происходит одновременно с расчетом, что позволяет немедленно интерпретировать получаемые результаты и вносить в технологию необходимые изменения.

Программа с успехом позволяет решать задачи моделирования и оптимизации процессов штамповки: определять силовые и энергетические параметры, производить расчеты кинематики течения металла и температурных полей, исследовать напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента. Полученные в результате расчетов данные создают основу для выявления и последующего учета технологической наследственности материала.

Структура главного окна программы QForm показана на рис. 6.

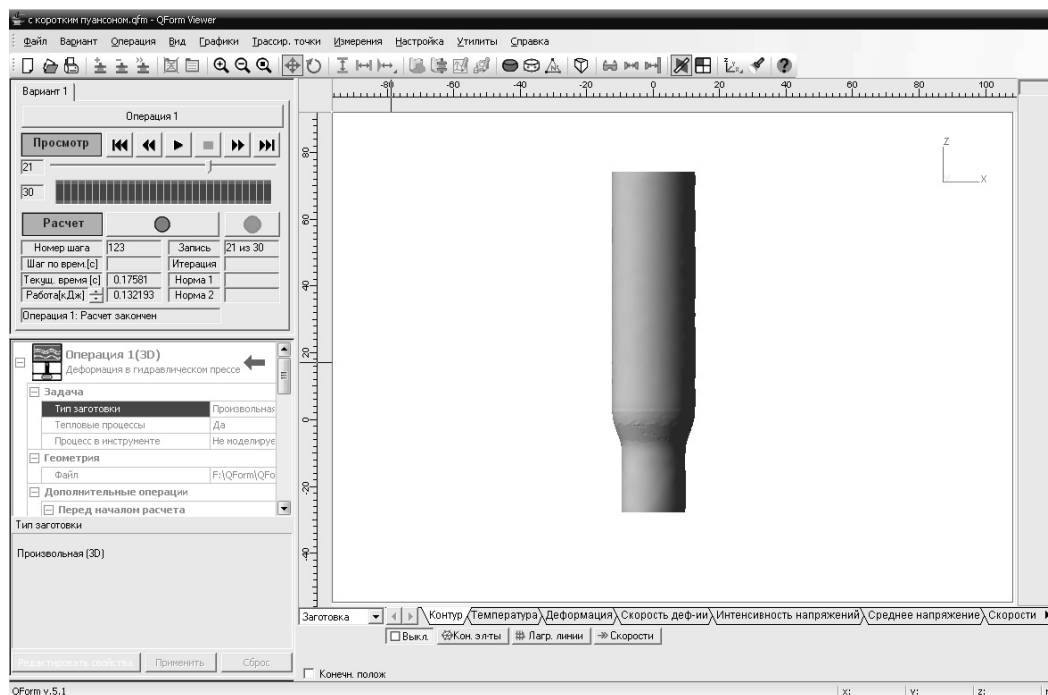


Рис. 6. Структура главного окна программы QForm

Исходные данные для расчета в общем виде отражены на рис. 7.

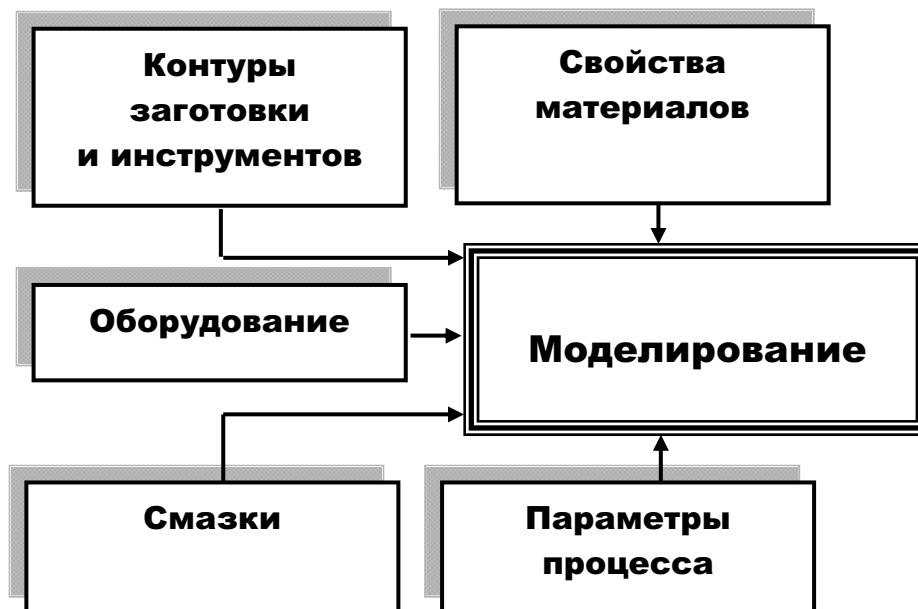


Рис. 7. Состав исходных данных для моделирования

После расчета в окне просмотра результатов можно увидеть текущее состояние моделирования, а также просмотр в заготовке векторов скоростей, полей температур, напряжений, деформаций и скоростей деформаций, деформированной делительной (лагранжевой) сетки, а также конечно-элементной сетки. Кроме того, можно увидеть разметку поля интенсивности напряжений.

На рис. 8 показаны форма в сечении и размеры детали после формообразования, рассчитанные программным комплексом QForm.

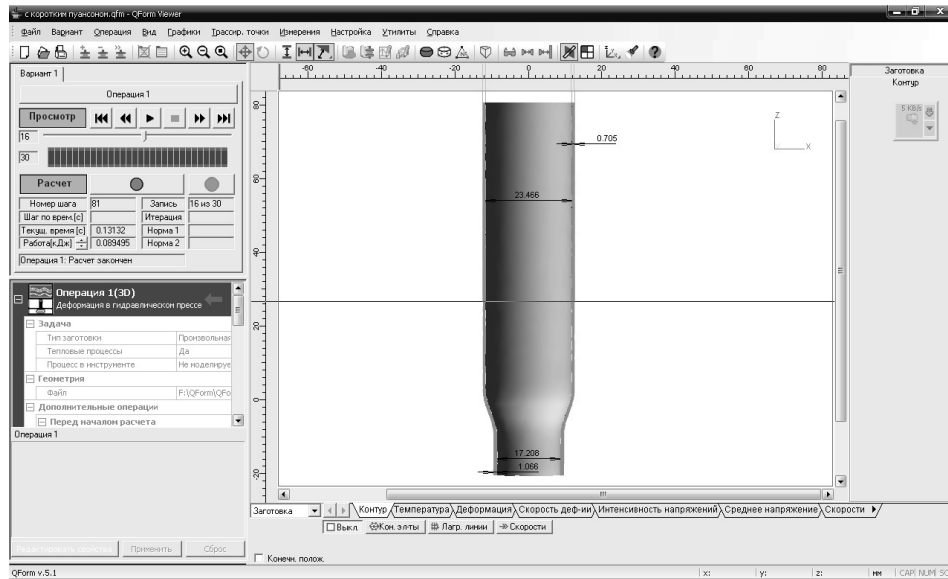


Рис. 8. Изменение формы геометрии после обжима трубчатой заготовки

В результате пластической деформации, особенно холодной, материалом наследуется (запоминается) неравномерное упрочнение и неоднородность свойств по объему штампованных изделий, которые являются причиной возникновения остаточных напряжений. Остаточные напряжения могут повысить или понизить прочность изделия, если оно не подвергается термической обработке после холодного пластического деформирования. Неоднородность свойств обусловлена, в первую очередь, неравномерным распределением накопленной деформации, расчет которой в обычной технологической практике затруднен [2].

На рис. 9 показано распределение интенсивности напряжений в процессе деформирования.

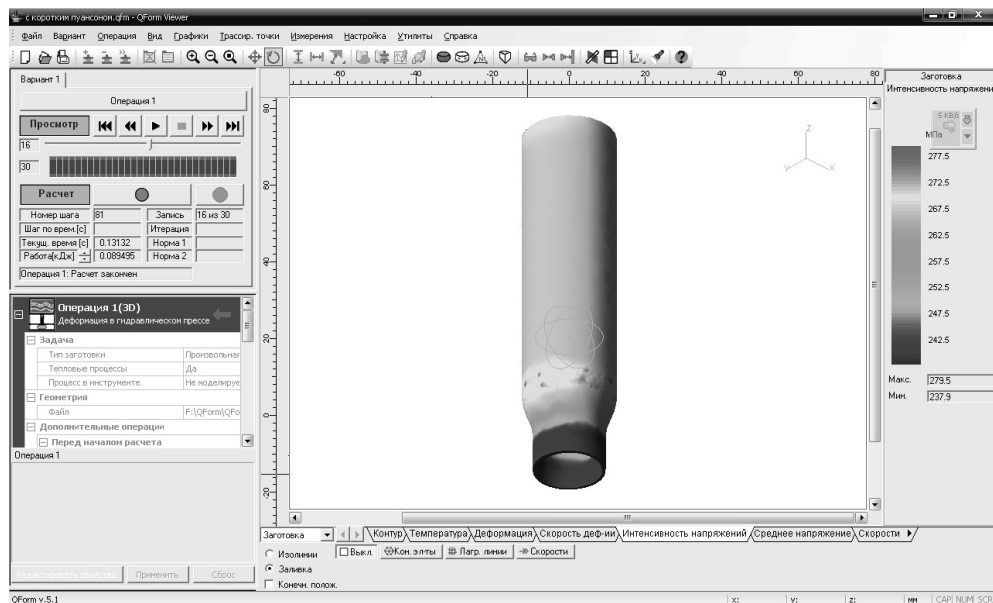


Рис. 9. Распределение интенсивности напряжений в процессе деформирования

В процессах холодной объемной и листовой штамповки возможности пластического формоизменения металлов ограничены. Очень часто деформации, необходимые для получения изделий требуемой формы, превышают пластичность материала (степень деформации, при которой образуется трещина в условиях данной механической схемы деформации) [3]. Развитие техники сопровождается созданием новых конструкционных материалов, при деформации которых даже в горячем состоянии возникает вероятность разрушения. Следовательно, на этапе проектирования технологических процессов необходимо установить, выдержит ли материал проектируемую операцию. Это приведет к интенсификации процессов обработки металлов давлением, а также значительной экономии, связанной с уменьшением объема производственных экспериментов по отладке процесса [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки [Электронный ресурс] / сост.: Н. В. Биба и др.; ООО «КванторФорм», г. Москва. URL: [http://qform3d.ru/db\\_files/326/1394.pdf](http://qform3d.ru/db_files/326/1394.pdf) (дата обращения 22.02.2013).
2. Пат. 124805 Российская Федерация U1 24/12. Устройство для испытания трубной заготовки / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин [и др.]; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – №2012121722/28; заявл. от 25.05.12; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4. – 3 с.
3. Колыхалов, Д. Г. Моделирование процесса обжима полых и трубчатых заготовок при использовании ледяных стержней в качестве рабочего тела / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Р. В. Шпорт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 78-85.
4. Прогрессивные способы изготовления трубопроводов летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, С. Б. Марьин, Б. И. Долотов, В. И. Якимов, А. В. Жабаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1 (10). – С. 4-10.



**Марьин Б. Н., Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Марьин С. Б.**  
**B. N. Maryin, E. B. Schelkunov, S. V. Vinogradov, S. B. Maryin**

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ  
ПОД ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ  
В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ**

**A HOLE-MAKING UNIVERSAL TOOL FOR LONG-LIFE BOLTED JOINTS  
IN AIRCRAFT ENGINEERING**

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Mr. Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Machines and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Щелкунов Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Mr. Evgeny B. Schelkunov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Виноградов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

**Mr. Sergey V. Vinogradov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: sergwin72@rambler.ru.

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Mr. Sergey B. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Machines and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Аннотация.** Представлен универсальный инструмент, позволяющий снизить трудоемкость работ, расширяющий технологические возможности обработки отверстий разных типоразмеров.

**Summary.** The paper presents a universal machining tool helping reduce the work labour input and enhance engineering capabilities for making holes of different sizes.

**Ключевые слова:** дорнирование, развертывание, протягивание, комбинированный инструмент, обработка, отверстие.

**Key words:** button-rifling, reaming, drawing, combined tool, machining, hole.

УДК 621

Одной из основных задач при создании современных самолетов является обеспечение высоких ресурсных показателей, которые в значительной степени определяются ресурсом болтовых и заклепочных соединений. Как показывает опыт эксплуатации авиационной тех-

ники, болтовые и заклепочные соединения являются концентраторами напряжений и источниками зарождения усталостных трещин.

В настоящее время в связи с повышением интереса к проблеме увеличения производительности производства необходима оптимизация существующих технологических процессов изготовления самолетов [1]. В этом отношении большой интерес для обработки отверстий в деталях самолетов представляют совмещенные операции с возможностью применения универсального инструмента при обеспечении высокого качества обработанной поверхности, оказывающей достаточно большое влияние на надежность болтового соединения.

Традиционно технология обработки высокоресурсных отверстий под болтовые соединения включает в себя операции сверления отверстий с припуском для дальнейшей обработки, развертывания или протягивания и упрочнения с помощью раскатки или дорнирования. Дорнирование отверстий может осуществляться протягиванием либо проталкиванием дорна через отверстие. Точность отверстий после дорнирования обычно не превышает девятого десятичного квалитетов. Это обусловлено разбросом величины упругого восстановления диаметра отверстия после дорнирования, а также отклонением от цилиндричности отверстия в результате облегченных условий деформирования вблизи кромок отверстия. Поэтому для обработки отверстий точнее девятого квалитета применяют после дорнирования окончательную лезвийную обработку: развертывание или протягивание.

В работе [2] приведена конструкция монолитной комбинированной протяжки-дорна, позволяющая сократить трудоемкость обработки отверстия в два - три раза и обеспечивающая высокую точность обработки.

Однако при использовании такого комбинированного инструмента не учитывается, что период стойкости режущей и дорнирующей частей существенно различен, и в случае износа какой-либо части необходима замена всего инструмента.

В КнАГТУ разработаны конструкции универсального составного инструмента [3, 4] для размерной обработки отверстий с их одновременным упрочнением. В виду того, что инструмент для обработки отверстий выполнен сборным, имеется возможность производить замену изношенного элемента. На рис. 1 представлена схема протяжки-дорна.

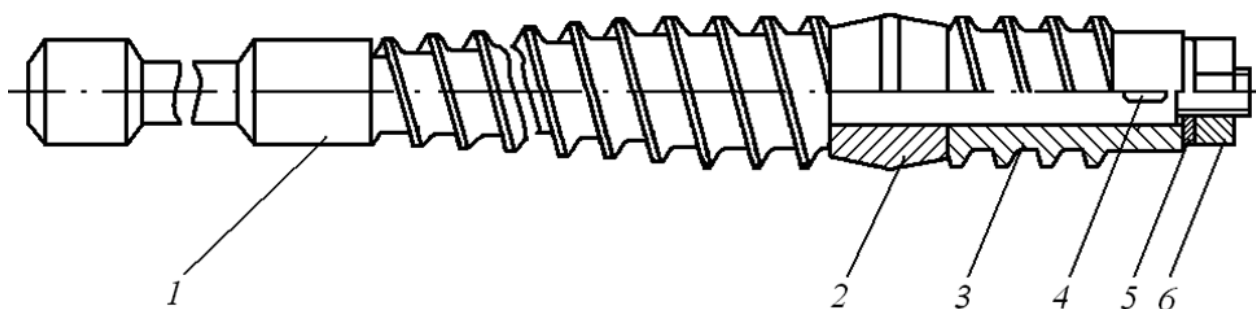


Рис. 1. Протяжка-дорн

Корпус 1 инструмента включает следующие элементы: хвостовик, направляющую режущую и калибрующую части протяжки, а также ось для установки насадного дорнирующего элемента 2 и насадной калибрующей части 3 протяжки. Дорнирующий элемент установлен на оси свободно, а насадная калибрующая часть 3 протяжки зафиксирована от проворота на оси корпуса с помощью шпонки 4, а в осевом направлении шайбой 5 и гайкой 6. Калибрующая часть 3 служит для окончательной обработки с целью придания требуемой точности отверстия после дорнирования.

В круглое отверстие заготовки устанавливается протяжка-дорн и закрепляется на станке, затем к ней прикладывается усилие. Посредством движения протяжки-дорна режущая часть начинает снимать слой металла заготовки. При дальнейшем прохождении протяжки-дорна через обрабатываемое отверстие дорнирующий элемент 2 за счет натяга совершает

дорнирование отверстия. При дальнейшем движении протяжки-дорна через отверстие оно окончательно обрабатывается калибрующей частью 3.

На рис. 2 представлена универсальная развертка-дорн.

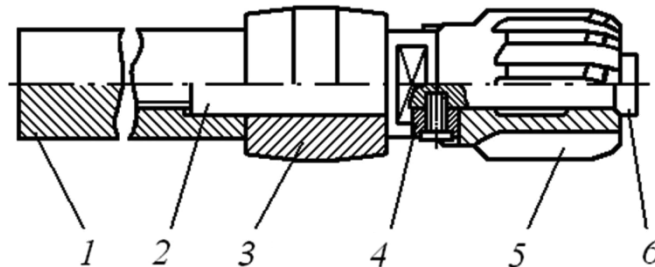


Рис. 2. Развертка-дорн

Корпус инструмента выполнен составным из оправки 2 и хвостовика 1. На оправке последовательно установлены дорнирующий элемент 3 и насадная развертка 5. Развертка 5 зафиксирована от проворота на оправке 2 торцевыми шпонками 4 и закреплена с помощью прижимного винта 1. Дорнирующий элемент установлен на оправке свободно и зафиксирован навинчивающимся на оправку хвостовиком 1. Хвостовик может быть выполнен цилиндрической или конической формы для закрепления инструмента в шпинделе станка.

Конструкция протяжки-дорна обеспечивает возможность замены изношенных насадной развертки и дорнирующего элемента на новые, а также возможность использования насадных разверток и дорнирующих элементов разного диаметра для обработки отверстий соответствующих диаметров, например, на оправке диаметром 13 мм возможно закрепить насадные развертки и дорнирующие элементы диаметрами от 25 мм до 30 мм.

Вывод: разработанный универсальный инструмент обладает повышенным ресурсом работы, позволяет снизить трудоемкость работ, расширяет технологические возможности обработки отверстий разных типоразмеров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкунов, Е. Б. *Металлообработка 2011* / Е. Б. Щелкунов, А. С. Хвостиков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 21-30.
2. Пекарш, А. И. *Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов* / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов [и др.]. – М.: Аграф-пресс, 2006. – С. 232-233.
3. Пат. RU № 134469 В23D 43/00. Протяжка-дорн / Марьин С. Б., Щелкунов Е. Б., Марьин Б. Н., Щелкунова М. Е., Виноградов С. В., Сысоев О. Е. – № 2013127982/02; заявл. 18.06.2013; опубл. 20.11.2013. Бюл. № 32.
4. Пат. RU № 128138 В23В 35/00 В23В 51/00. Инструмент для обработки отверстий / Быченко В. Н., Марьин Б. Н., Щелкунов Е. Б., Щелкунова М. Е., Виноградов С. В., Шпилев А. М. Марьин С. Б. – № 2012143584/02; заявл. 11.10.2012; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.

Мироненко В.В., Чеславская А.А., Белых С.В.

РАСЧЕТ РАЗВЕРТОК ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА В РЕЗУЛЬТАТЕ ФОРМОВКИ

Мироненко В. В., Чеславская А. А., Белых С. В.

V. V. Mironenko, A. A. Cheslavskaya, S. V. Belykh

РАСЧЕТ РАЗВЕРТОК ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА В РЕЗУЛЬТАТЕ ФОРМОВКИ

CALCULATING DEVELOPED VIEWS OF AIRCRAFT PARTS WITH ACCOUNT OF SHEET THICKNESS VARIATION RESULTING FROM FORMING

**Мироненко Владимир Витальевич** – программист учебно-научного центра Autodesk кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79501110235. E-mail: mironenko\_vv@istu.edu

**Mr. Vladimir V. Mironenko** – programming specialist, Educational and Research Centre “Autodesk”, Department of Aircraft Engineering and Operation, National Research Technical University in Irkutsk (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, Lermontov Str.; +7 950 1110235. E-mail: mironenko\_vv@istu.edu

**Чеславская Агния Альбертовна** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Проектирование и виртуальное моделирование изделий и технологических процессов в авиастроении» кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79086463061. E-mail: chaa@yandex.ru

**Mrs. Agniya A. Cheslavskaya** - Junior Research Fellow, Research Laboratory "Design and Computer Simulation of Aircraft Engineering Products and Processes", Department of Aircraft Engineering and Operation", National Research Technical University in Irkutsk (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, 83, Lermontov Str.; telephone: +7 908 6463061. E-mail: chaa@yandex.ru

**Белых Сергей Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +79141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

**Mr. Sergei V. Belykh** – PhD of Engineering, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin St.; +7 914 1795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

**Аннотация.** Проведен анализ существующих методов получения разверток и показаны их недостатки. Предложен новый метод получения разверток с учетом предварительной разнотолщинности в детали. На примере одной детали показано получение развертки предложенным методом.

**Summary.** The paper offers analysis of existing methods for obtaining developed views of component parts, and shows their weak points. We propose a new method of producing developed views with preliminary consideration of component parts' thickness variation. Taking one such component part as an example, we demonstrate the process of making its developed view by the proposed scanning method.

**Ключевые слова:** эластоформование, получение разверток, моделирование.

**Key words:** elasto forming, developing views, simulation.

УДК 621.7.04

В конструкции самолета очень большое количество деталей изготавливается из листового полуфабриката. Поэтому является актуальной задача получения точных разверток деталей, не требующих больших доработочных операций после завершения формообразова-

ния. Точные развертки существенно снижают трудоемкость слесарных доводочных работ при изготовлении деталей.

На сегодняшний день в авиационной промышленности самым распространенным методом получения разверток является геометрический, построенный на основе закона постоянства площадей. Этот метод не учитывает ряд параметров:

- свойства материала;
- специфику метода формообразования;
- историю деформации;
- историю контактов во время разворачивания;
- изменение толщины при формообразовании.

Перечисленные недостатки приводят к значительным погрешностям в геометрии получаемых разверток. Для компенсации погрешностей назначаются большие технологические припуски.

На смену этому методу пришел упрощенный метод обратного подхода (Inverse). Он заключается в том, что деформации и история контактов учитываются только в начальном и конечном положении детали, без промежуточных состояний. В этом подходе учитываются свойства материала, но не учитывается полная история деформации и контактов, вносящих свои погрешности. Итак, этот метод имеет недостатки:

- не учитывает специфику метода формообразования;
- ведет упрощенный учет истории деформации;
- ведет упрощенный учет истории контактов во время разворачивания;
- при получении развертки детали принято допущение, что значение толщины заготовки неизменно.

Обратный метод позволяет получить предварительное распределение толщины детали или разнотолщинность.

В данной статье предлагается метод получения разверток, в котором устранены недостатки предыдущих методов. Предлагаемый метод получения разверток рассмотрен на примере разворачивания детали типа «Профиль» со сложной пространственной формой (см.

Рис. 1). Эта деталь имеет ряд формуемых элементов, таких как борта и подсечки. Деталь изготавливается из материала АМг 3, толщиной 1,2 мм, с габаритными размерами 350 × 70 × 140 мм.

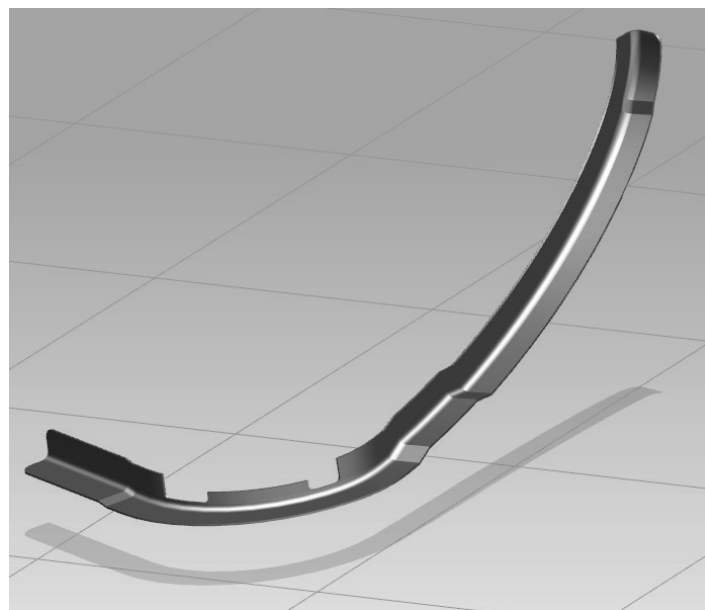


Рис. 1. Анализируемая деталь

Для реализации расчета по предлагаемому методу использован программный комплекс RAM-STAMP и его решатели Inverse и Autostamp. Расчет развертки детали выполняется в два этапа.

На первом этапе отогнуты борта и развернуты подсежки на эквидистантную поверхность фланца по упрощенному методу обратного подхода (см. Рис. 2). Результатом этого этапа является предварительное получение распределения толщины детали.

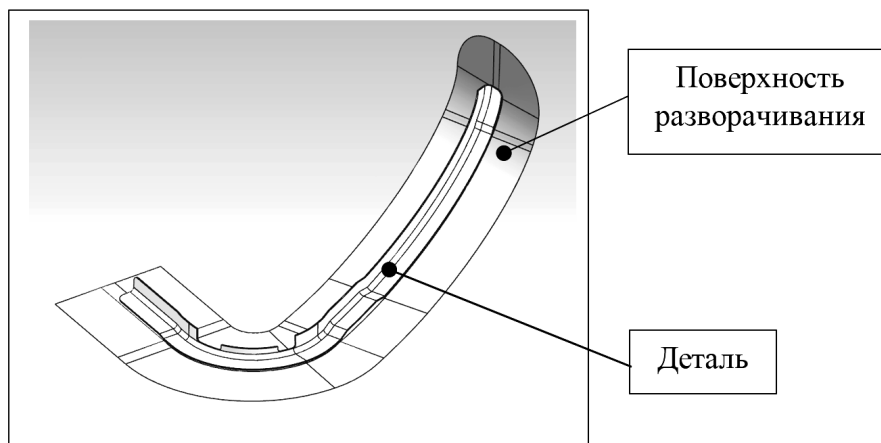


Рис. 2. Первый этап разворачивания по методу обратного подхода

Для моделирования в программном комплексе RAM-STAMP для первого этапа разворачивания был использован решатель Inverse, который работает по алгоритмам упрощенного метода обратного подхода. Модель материала АМг 3 была задана следующими параметрами:

- модуль Юнга – 68 ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0,3;
- плотность – 2,6 кг/мм<sup>3</sup>;
- пластическая часть кривой течения задана через функцию «Krupkowsky law»,

имеющую вид  $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$ . Константы данной функции для материала АМг3 равны:  $K = 0,4167$  ГПа,  $n = 0,2663$ ,  $\epsilon_{ps0} = 0,005854$  (см. Рис. 3).

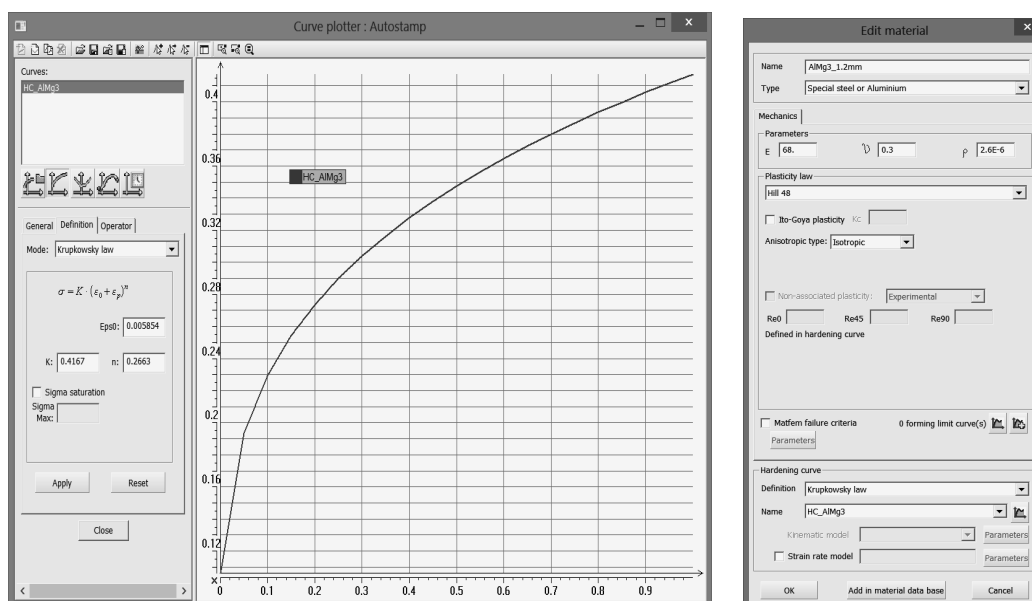


Рис. 3. Задание пластической части кривой течения

и параметров материала в ПК PAM-STAMP

Заданы граничные условия, в которых областям детали, эквидистантным поверхности разворачивания, запрещены все перемещения и вращения вокруг всех осей. Также на подсечки наложены ограничения по перемещению вдоль оси  $X$  для устранения утягивания фланца во время разворачивания (см. Рис. 4).

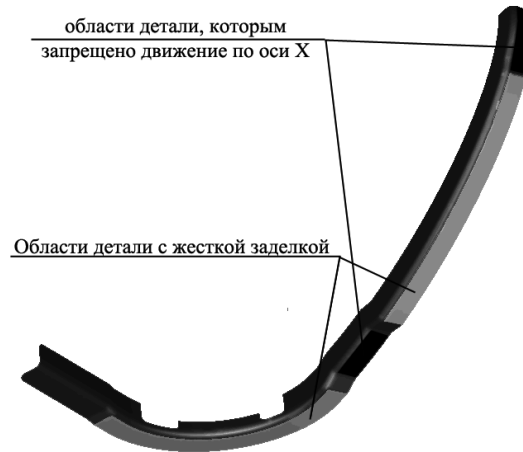


Рис. 4. Граничные условия

В исходных данных задана постоянная толщина детали 1,2 мм. В результате моделирования первого этапа разворачивания была получена развертка детали на эквидистантную поверхность фланца (см. рис. 5, а), а также предварительное распределение толщин на детали (см. рис. 5, б).

В результате выполнения первого этапа моделирования получено предварительное распределение толщин с упрощённым учетом истории контакта и деформации. Эта информация используется как исходная для следующего этапа разворачивания, т.е. учитывается разнотолщинность детали при получении заготовки. Для учета полной истории контакта и деформации на втором этапе используется более точный решатель – Autostamp. Он используется для решения задач формообразования деталей и решения сложных динамических задач. На втором этапе задача разворачивания представлена в виде динамической задачи, состоящей из двух расчётных шагов:

- разворачивания детали на эквидистантную поверхность фланца;
- разворачивания поверхности фланца первого шага до плоскости.

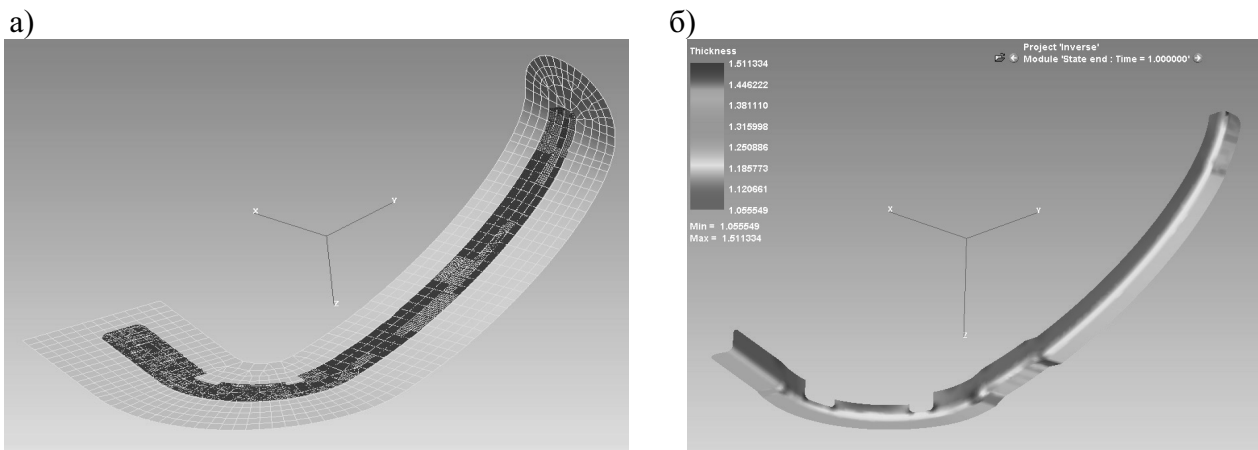


Рис. 5. Результаты моделирования первого этапа разворачивания:

- а – развертка детали на эквидистантную поверхность фланца;  
б – распределение толщин на детали (максимальная толщина – 1,51 мм;  
минимальная толщина – 1,05 мм)

В качестве граничных условий используются те же закрепления поверхностей, что и в первом этапе. В качестве нагрузки используется давление математической жидкости без необходимости ее дискретизации (т.е. жидкость не моделируется конечными элементами, а рассматривается поведение объекта под воздействием этой жидкости). Так как решается динамическая задача разворачивания детали, то нам доступны промежуточные этапы, следовательно, учитывается история контакта и деформации.

После расчета полученный контур развертки можно экспортировать в геометрическую модель, откуда она может быть использована для разработки управляющей программы для станка с ЧПУ для изготовления развертки по полученному контуру (см. рис. 6Рис).

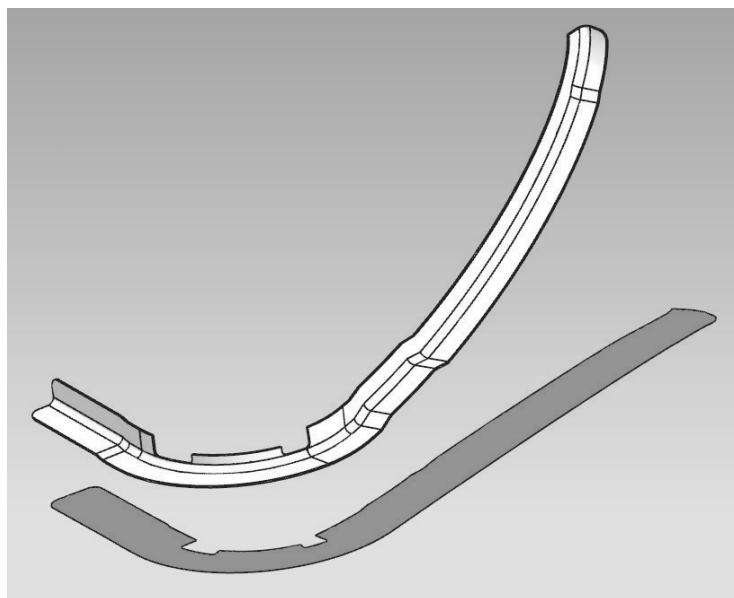


Рис. 6. Деталь и развертка в системе геометрического моделирования

В результате разработки был получен новый метод, позволяющий учитывать недостатки имеющихся на сегодняшний день методов разворачивания деталей. С помощью разработанного метода можно получать развертки с минимальными припусками или же без них (т.е. после формообразования получается готовая деталь без необходимости подгонки по контуру), что позволит сократить трудоемкость изготовления деталей.

Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

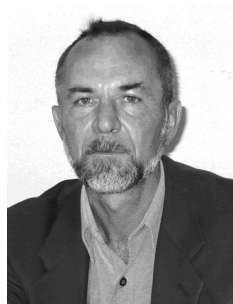
#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченков, Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченков; под общ. ред. Л. П. Гордеева. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
2. Применение эластосъучих сред в листовой штамповке / С. Б. Марьин, А. И. Олейников, В. В. Куриный, Н. Н. Куриная // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 105-109.
3. Pam-stamp 2012 User's Guide, ESI Group, 2012 – 960 с.
4. Малащенко, А. Ю. Конечно-элементное моделирование процесса изготовления гибридных листовых деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 40-43.

**Зайков В. И.**  
**V. I. Zajkov**

**МОДУЛЯЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО  
ЛАЗЕРА СЕРИИ DLDPМ12-625-25**

**INTENSITY-MODULATED EMISSION OF THE DLDPМ12-625-25 SEMI-CONDUCTOR  
LASER**



**Зайков Валерий Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление недвижимостью и кадастры» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, д. 8, кв. 17. E-mail: valerii\_zajkov@mail.ru.

**Mr. Valery I. Zajkov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Real Property Management and Cadastre, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681013, Komsomolsk-on-Amur, 8, Kotovskogo Str., apt.17. E-mail: valerii\_zajkov@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования модуляции непрерывного излучения лазерного модуля серии DLDPМ12-655-25, позволяющие установить наиболее оптимальный режим генерации по соотношению между средней мощностью излучения и потребляемой нагрузкой.

**Summary.** The paper presents the results of an investigation of continuous modulated radiation of the DLDPМ12-655-25 laser, with the purpose of determining the optimal mode of generation depending on the ratio between laser average emission power and input.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазерный модуль, режим генерации, мощность излучения, модуляция, ток нагрузки.

**Key words:** semi-conductor laser, generation mode, emission power, modulation, load current

УДК 535.8:621.373.8

Современный уровень развития интегральной оптики и электроники обеспечивает создание таких уникальных источников излучения на базе полупроводниковых лазерных модулей инжекционного типа, которые по своим пространственно-энергетическим параметрам могут быть использованы для модернизации существующих лазерно-оптических устройств [1].

Отличительными признаками такого рода источников излучения являются:

- достаточно высокая степень пространственной и временной когерентности;
- оптимальная мощность и одномодовый состав излучения;
- возможность эффективной модуляции интенсивности излучения за счет изменения

тока нагрузки;

- небольшие габаритные размеры лазерного модуля и блока питания;
- оптимальный режим эксплуатации при использовании источника постоянного тока с напряжением, не превышающим 2,5 – 4,0 В [2].

В качестве объекта исследования рассматривается полупроводниковый лазерный модуль инжекционного типа на основе арсенида галлия серии DLDPМ12-655-25. Пространственно-энергетические характеристики лазерных модулей данной серии в целом известны и наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым при проектировании лазерно-оптических измерительных устройств.

### Схема установки и методика исследования

Базовый вариант конструкции лазерного модуля серии DLDPM12-625-25 составляют следующие основные элементы:

- полупроводниковый инжекционный лазер на гетероструктуре типа AlGaInP/GaAs с генерацией излучения на длине волны  $\lambda = 0,655$  мкм;
- электронный блок стабилизации выходной мощности лазерного излучения;
- короткофокусная положительная линза.

Схема компоновки основных элементов и общий вид конструкции лазерного модуля DLDPM-625-25 показаны на рис. 1. Полупроводниковый инжекционный лазер 1 на структуре AlGaInP/GaAs закреплен в оправе и установлен внутри цилиндрического корпуса, выполненного из алюминиевого сплава типа Д16Т. Технология сборки лазерного модуля обеспечивает центрирование зоны излучения на торцевой поверхности активного слоя относительно оси корпуса с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,05$  мм. Для коллимации лазерного излучения в конструкции модуля используется короткофокусная положительная линза 2, которая обеспечивает преобразование исходного излучения в лазерный пучок с углом расходимости, не превышающим 0,1 мрад. Полупроводниковый инжекционный лазер на структуре AlGaInP/GaAs подключен к электронному блоку 3 для стабилизации выходной мощности лазерного излучения.

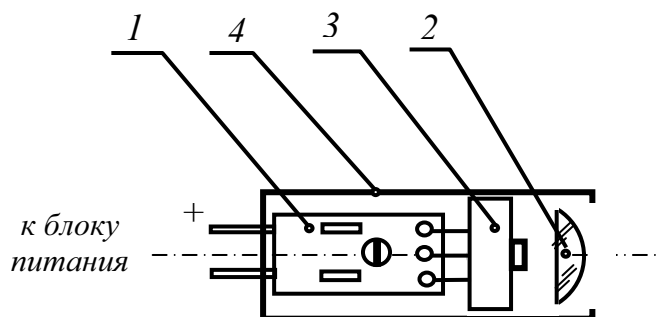


Рис. 1. Общий вид конструкции лазерного модуля DLDPM-625-25:

- 1 – полупроводниковый инжекционный лазер на структуре AlGaInP/GaAs;  
 2 – короткофокусная положительная линза в оправе;  
 3 – электронный блок; 4 – корпус

Стабилизация выходной мощности достигается за счет создания отрицательной обратной связи между источником излучения и регулятором величины инжекционного тока. Схема электронного блока с отрицательной обратной связью представлена на рис. 2. Опорное напряжение задается с помощью параметрического стабилизатора, выполненного на элементах *СД* и *RI*, и подается на вход регулятора рабочего тока полупроводникового инжекционного лазера *ЛД*. Регулятор рабочего тока в представленной схеме выполнен на элементах *T2*, *T1*, *Д1* и *R2*. Для формирования сигнала в режиме отрицательной обратной связи в схему полупроводникового инжекционного лазера включен фотодиод *ФД*, реагирующий на величину изменения выходной мощности излучения. Полученный сигнал рассогласования с фотодиода подается на регулятор рабочего тока, который, в свою очередь, за счет увеличения или уменьшения инжекционного тока нагрузки стабилизирует величину выходной мощности излучения.

Таким образом, возможность регулировки выходной мощности излучения полупроводниковых лазеров осуществляется путем изменения величины инжекционного тока нагрузки [2; 3]. Для оценки эффективности метода модуляции необходимо установить зависимость выходной мощности излучения полупроводникового лазера от параметров его вольт-амперной характеристики.

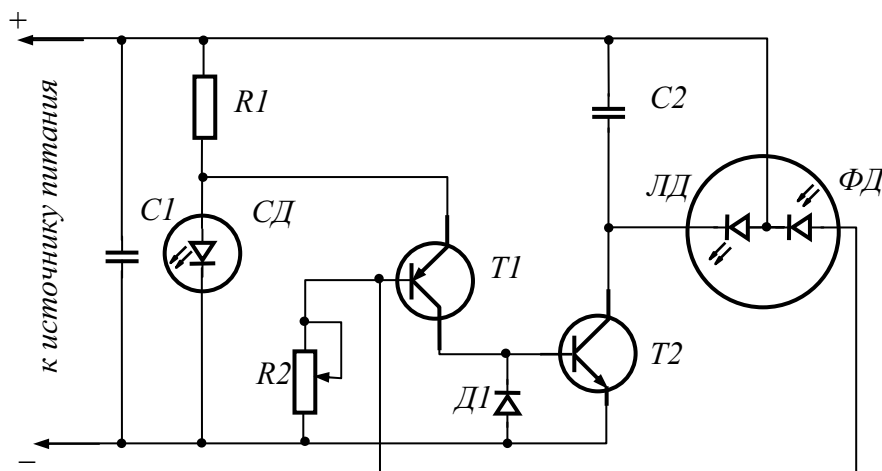


Рис. 2. Схема электронного блока с отрицательной обратной связью

Измерение выходной мощности излучения лазерного модуля выполняется при стационарном режиме работы электронного блока, подключенного к источнику питания с номинальным постоянным напряжением  $U_0 = 4,5$  В. Электрическая схема установки представлена на рис. 3. В соответствии с предлагаемой схемой измерения инжекционный ток нагрузки и напряжение изменяются с помощью переменного резистора  $R_y$ , включенного последовательно между источником питания и лазерным модулем. Регистрация изменения напряжения осуществляется с помощью цифрового комбинированного прибора Щ4313, а регистрация тока нагрузки – с помощью миллиамперметра типа М4202 ГОСТ 8711-60.

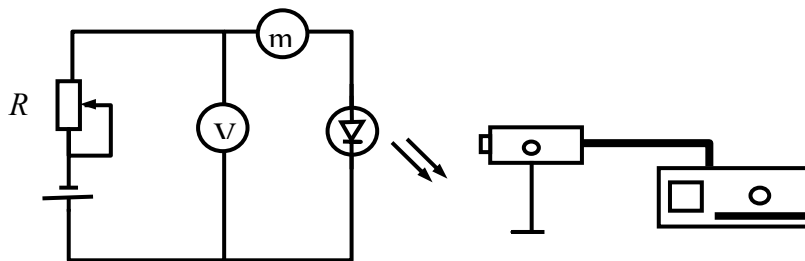


Рис. 3. Электрическая схема установки

Для измерения средней мощности лазерного излучения используется устройство типа ИМО-2Н. Приемный блок этого устройства, установленный на штативе, располагается на расстоянии 40 – 60 мм от источника излучения. Методика исследования заключается в определении средней мощности излучения лазерного модуля в процессе дискретного изменения величины инжекционного тока нагрузки. Дискретное изменение инжекционного тока нагрузки регистрируется до значения 2,0 мА по миллиамперметру типа М4202 ГОСТ 8711-60.

Общий характер изменения средней мощности (интенсивности) излучения полупроводникового инжекционного лазера в зависимости от величины тока нагрузки и напряжения источника питания в графическом виде представлен на рис. 4.

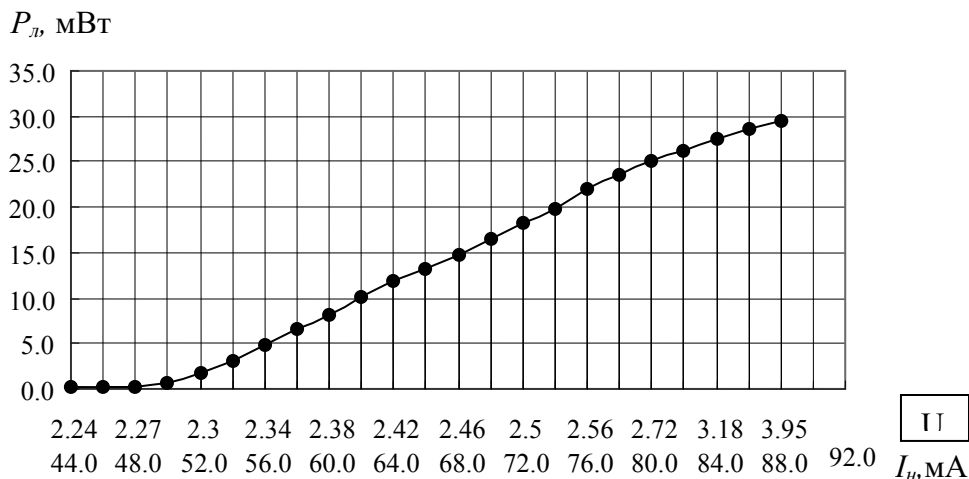


Рис. 4. Общий характер изменения средней мощности (интенсивности) излучения полупроводникового инжекционного лазера от величины тока нагрузки и напряжения источника питания

Анализ полученной зависимости  $P_l = f(I_n, U_n)$  показывает, что постепенное увеличение тока нагрузки приводит к монотонному возрастанию выходной мощности (интенсивности) излучения полупроводникового лазера. Минимальное изменение средней мощности излучения от 0,10 до 0,75 мВт установлено при увеличении тока инжекции с 42 до 52 мА. В этом диапазоне зависимость  $P_l = f(I_n, U_n)$  носит явно нелинейный характер, что позволяет зафиксировать величину порогового тока нагрузки в точке перегиба на уровне  $I_n \approx 50,0 \pm 2,0$  мА. Последующее повышение инжекционного тока нагрузки от 50 до 84 мА приводит к увеличению средней мощности излучения до 25 мВт.

График изменения функции  $P_l = f(I_n, U_n)$  на этом участке становится практически линейным с коэффициентом пропорциональности по току  $k_i = 1,2$ . Дальнейшее увеличение тока нагрузки до 92 мА при изменении входного напряжения от 2,7 до 4,0 В приводит к нелинейному возрастанию средней мощности излучения с тенденцией к стабилизации на уровне 32 – 35 мВт.

Таким образом, наиболее оптимальным с точки зрения соотношения между средней мощностью излучения и потребляемой нагрузкой является режим генерации с мощностью излучения, равной  $25,0 \pm 0,5$  мВт при инжекционном токе нагрузки 78 мА. В соответствии с предложенной методикой выполнено исследование режима модуляции интенсивности непрерывного излучения для лазерных модулей серии DLDPM12-655-25, что позволяет использовать полученные результаты для повышения эффективности эксплуатации данных устройств при регулировании выходной мощности излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байбородин, Ю. В. Основы квантовой техники / Ю. В. Байбородин. – Киев: Вища школа, 1981. – 408 с.
2. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоги, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окоги; пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
3. Зайков, В. И. Метод измерения параметров диаграммы направленности излучения полупроводникового инжекционного лазера серии DLDPM12-655-25/ В. И. Зайков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № III-1(11). – С. 17-20.

**Приходченко О. В., Просолович А. А., Ким К. К.**  
**O. V. Prikhodchenko, A. A. Prosolovitch, K. K. Kim**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА В СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ МЕТОДАМИ ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

### **INVESTIGATION OF MASS&HEAT EXCHANGE PROCESSES IN INTEGRATED ENERGY DEVICES BY THE METHOD OF VISUAL ANALYSIS**



**Приходченко Оксана Вадимовна** – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: okpr68@mail.ru

**Ms. Oksana V. Prikhodchenko** – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: okpr68@mail.ru



**Просолович Алексей Александрович** – доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), E-mail: alpr72@mail.ru

**Mr. Aleksey A. Prosolovitch** – Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: alpr72@mail.ru



**Ким Константин Константинович** – профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Mr. Konstantin K. Kim** – Professor, Department of Theory of Electromechanics, Saint-Petersburg State Technical University (Russia, Saint-Petersburg). E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Аннотация.** В работе рассматриваются результаты численного моделирования гидродинамических процессов в совмещенных энергетических устройствах (СЭУ) и возможные варианты визуализации результатов расчета в системе инженерного анализа SolidWorks Flow Simulation.

**Summary.** The paper considers the results of numerical modelling of hydrodynamic processes in integrated energy devices (IED) and possible ways of visualizing calculation results in the SolidWorks Flow Simulation reverse engineering system.

**Ключевые слова:** совмещенное энергетическое устройство, численное моделирование, гидродинамический расчет, визуализация, инженерный анализ.

**Key words:** integrated energy devices, hydrodynamic calculation, visualization, reverse engineering.

УДК 539.3

Создание новых видов энергетических устройств, обеспечивающих возможность энерго- и ресурсосбережения, характеризующихся возможностью экономичного и точного поддержания заданных эксплуатационных показателей и отвечающих современным требованиям электробезопасности, надежности, технологичности и экологичности, является актуальной задачей.

Примерами такого оборудования могут служить совмещенные энергетические устройства (СЭУ) для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, обеспечивающие повышение эффективности производства и снижение себестоимости конечной продукции [3, 4]. Основными достоинствами устройств такого типа являются существенное улучшение технико-экономических показателей за счет совмещения в одном устройстве функций приводного, передаточного и исполнительного механизмов, возможность точного регулирования мощности электронагрева непосредственно в месте потребления и выходных характеристик транспортных систем, а также повышенный коэффициент теплоотдачи и теплопроизводительность.

Целью исследования является анализ влияния параметров исполнительного элемента (ИЭ) СЭУ [6, 2] на выходные характеристики и эффективность устройства с использованием современных подходов, обеспечиваемых методами и средствами математического моделирования.

Основной проблемой при проектировании СЭУ является сложность преобразования энергии в рассматриваемых устройствах, связанная с необходимостью одновременного учета электромагнитных, гидравлических и тепловых процессов, поэтому для определения оптимальных конструктивных параметров элементов СЭУ наряду с теоретическими и практическими разработками в области электромеханики, механики, теплотехники, гидравлики, электромашиностроения используются современный математический аппарат [5], численные методы, методы планирования эксперимента и проектирования с привлечением интегрированных САПР (CAD/CAE-систем) [6], которые в настоящее время являются мощным инструментом создания современных технических систем и широко используются при решении задач поискового проектирования, оптимизации и моделирования сложных физических процессов. Это позволяет создать научно обоснованную методику проектирования устройств данного типа при одновременном учете электромагнитных, тепловых и механических факторов на температуру, производительность и давление преобразователя.

Особый интерес при исследовании и проектировании СЭУ представляет решение задачи гидродинамического расчета с использованием CFD-технологий, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. Большие возможности анализа потока жидкостей предлагает модуль SolidWorks Flow Simulation системы SolidWorks, которая исторически является одной из первых систем проектирования и анализа, содержащих полноценные интегрированные инструменты решения задач гидрогазодинамики и теплообмена.

Основными достоинствами SolidWorks Flow Simulation при моделировании и исследовании СЭУ являются:

- использование единой среды проектирования и анализа;
- возможность моделирования стационарного внутреннего течения несжимаемой жидкости, учет вынужденной конвекции, а также турбулентного и переходного течения;
- выбор в качестве граничных условий объемного расхода (на входе) и давления (на выходе), неподвижной стенки;
- генерация расчетной сетки непосредственно по модели SolidWorks, автоматическое создание расчетной области и генерация сетки в области твердого тела и области течения, настройка параметров расчетной сетки для повышения точности расчета зоны теплопередачи, учет вращающихся и неподвижных объемов;
- при управлении вычислительными процедурами: задание целей моделирования (осевой составляющей скорости в объемах, в характеристических зонах устройства – зоне теплообмена и перемещения теплоносителя) и мониторинг их параметров в ходе расчета с

предварительным просмотром результатов (полей течения в заданных сечениях) без его остановки;

– вывод результатов и визуализация в виде цветowych эпюр на плоскости или поверхности, 3D-траектории течений, распределения любой характеристики вдоль кривой; анимации результатов и др.

В ходе моделирования гидродинамических процессов в СЭУ в среде SolidWorks Flow Simulation можно выделить следующие основные этапы:

- создание расчетной параметрической трехмерной модели СЭУ;
- задание граничных условий (см. рис. 1);
- выбор моделей, представляющих физические явления, происходящие в жидких средах (течение жидкости, теплопередача);
- выбор метода расчета, вычисления;
- анализ результатов расчета.

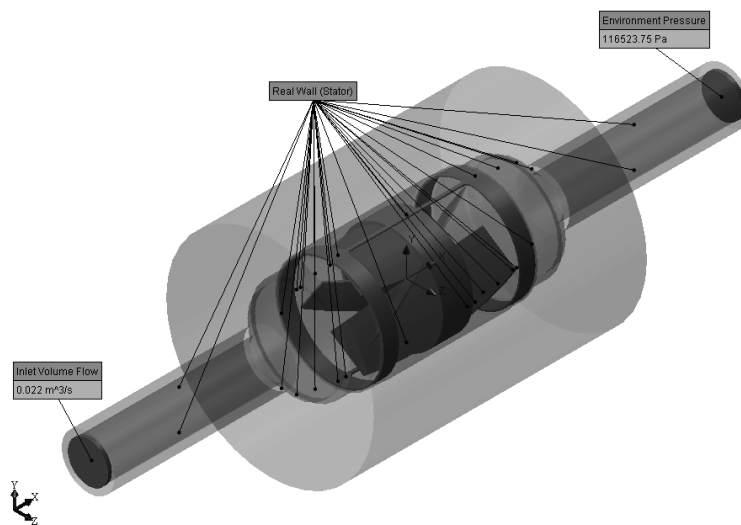


Рис 1. Расчетная модель СЭУ

После выполнения гидродинамического расчета в СЭУ результаты расчета и визуализация могут быть представлены в виде [1]:

- цветовых эпюр в сечении (Cut plots);
- цветовых эпюр на поверхности (Surface plots);
- отображения результатов с помощью изоповерхностей (Isosurfaces);
- визуализации линий тока (Flow trajectories);
- просмотра значений параметров в точке (Point parameters);
- просмотра значений параметров на поверхности (Surface parameters);
- просмотра значений параметров в объеме (Volume parameters);
- графиков (XY plots);
- графиков изменения сходимости целей (Goals);
- отчета (Report);
- создания фильмов (Animations).

На рис. 2 – 10 показаны некоторые возможные варианты визуализации результатов гидродинамического расчета СЭУ в среде SolidWorks Flow Simulation.

С помощью *Cut Plots* визуализировано распределение значений скорости течения теплоносителя в поперечном сечении (см. рис. 2). Распределение параметра показано в виде заливок (*Contours*) и векторов скорости (*Vectors*). Заливки и векторы раскрашены в соответствии с распределением скорости.

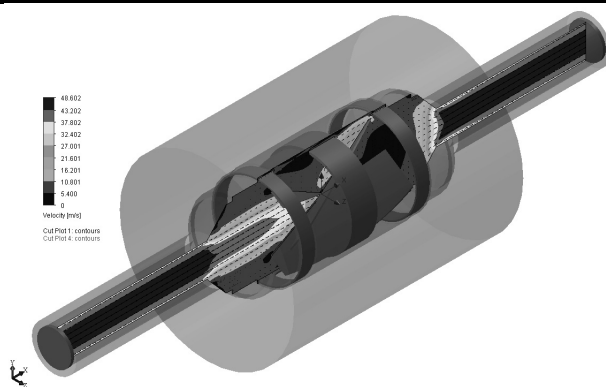


Рис 2. Cut Plots: распределение скорости в продольном сечении (Contours, Vectors)

С помощью *Surface Plots* визуализировано распределение значений скорости течения рабочей среды по выбранной поверхности модели (границы лопасти), контактирующей с текучей средой (см. рис. 3). Целевая поверхность выбирается непосредственно на модели.

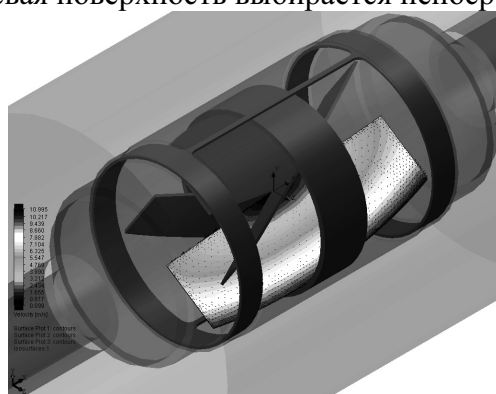


Рис. 3. Surface Plots: распределение скорости на грани лопасти (Contours, Vectors)

*Isosurfaces* показывает поверхность, в каждой точке которой значение давления равно определенной величине (см. рис. 4). Поверхности уровня раскрашены в соответствии с распределением давления на изоповерхности.

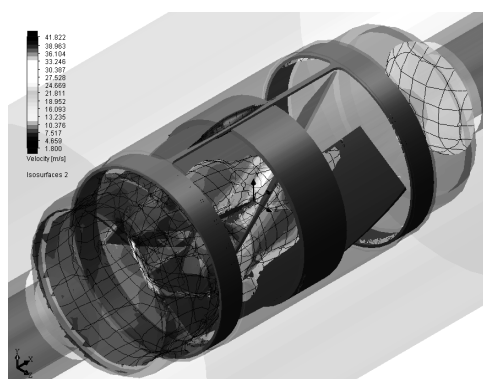


Рис. 4. Isosurfaces: поверхности уровня давления, с нанесенными на них значениями скорости в режиме заливки с сеткой

С помощью *Flow Trajectories* построены линии тока текучей среды в канале СЭУ, т. е. линии, в каждой точке которых вектор скорости направлен по касательной к ним (см. рис. 5).

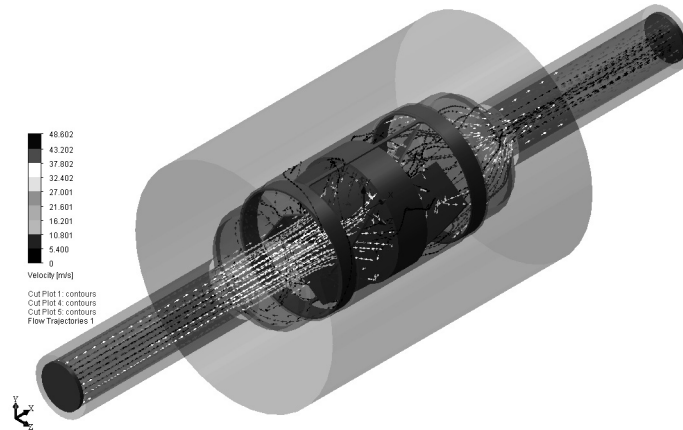


Рис. 5. Визуализация линий тока с наложенной на них скоростью

Одним из эффектных способов визуализации результатов является создание фильма линий тока. Такой фильм наглядно показывает распространение текучей среды по объему расчетной области.

С использованием *Point Parameters* определяются значения скорости в пределах расчетной области в определенных точках, заданных на выходе лопасти (см. рис. 6).

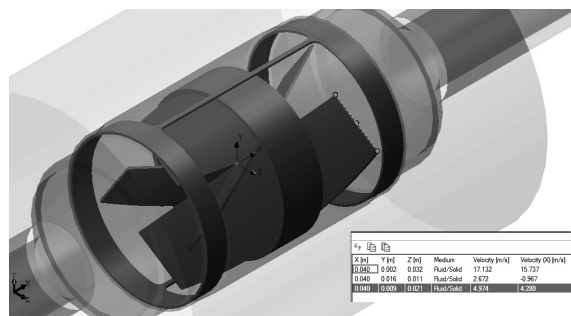


Рис. 6. Point Parameters: значение скорости в трех точках на выходе лопасти

С помощью *Surface Parameters* можно определить значения локальных физических параметров (давления, температуры, скорости и т. д.) и интегральных физических параметров (расходы, силы, моменты и т. д.) на выбранной поверхности. При исследовании СЭУ определяются значения скорости течения теплоносителя и давления на грани лопасти (см. рис. 7).

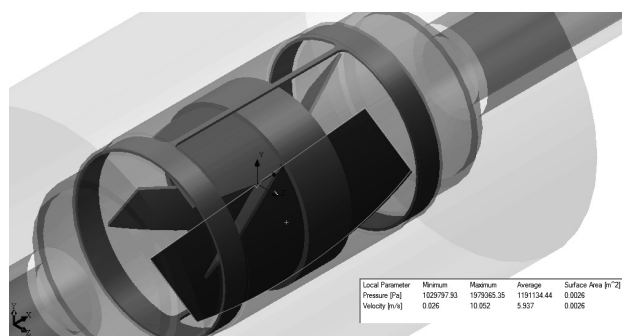


Рис. 7. Surface Parameters: значение скорости и давления на грани лопасти

Для расчета средней скорости по объему в зонах теплообмена и перемещения теплоносителя создаются вспомогательные тела. При расчете средней скорости данные тела задаются как отдельные компоненты и указываются в качестве расчетных объемов. С помощью средства *Volume Parameters* определяются средние значения осевой составляющей скорости рабочей среды в выбранном объеме (см. рис. 8).

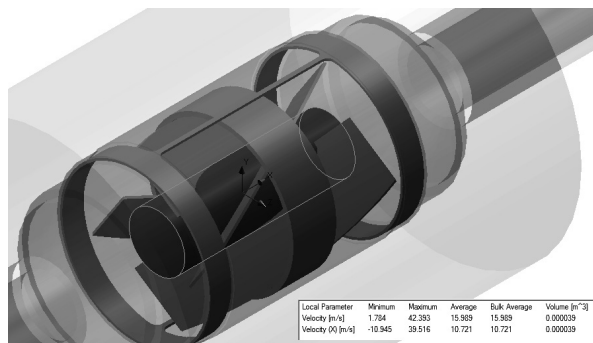


Рис. 8. Volume Parameters: значение скорости в указанном объеме

*XY Plot* позволяет посмотреть изменение физических параметров вдоль заданной линии. В качестве этой линии можно использовать любую определенную графическими средствами линию, например, двумерные или трехмерные эскизы, кривые. На рис. 9 показано изменение скорости вдоль кромок на входе и выходе лопасти.

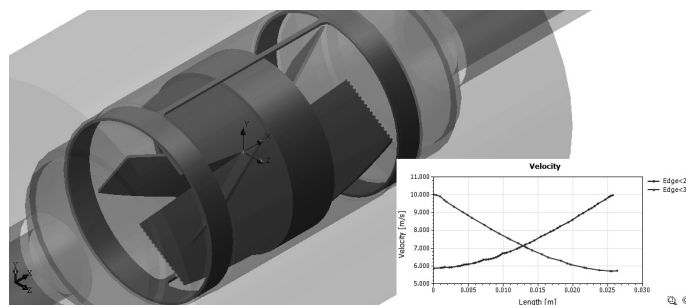


Рис. 9. XY Plot: изменение скорости вдоль кромок на входе и выходе лопасти

С помощью средства визуализации *Goal Plots* предоставляется возможность контролировать изменение в процессе расчета физического параметра, заданного как цель. При исследовании СЭУ в качестве целевых параметров выбраны минимальное и максимальное значения осевой составляющей скорости (см. рис. 10).

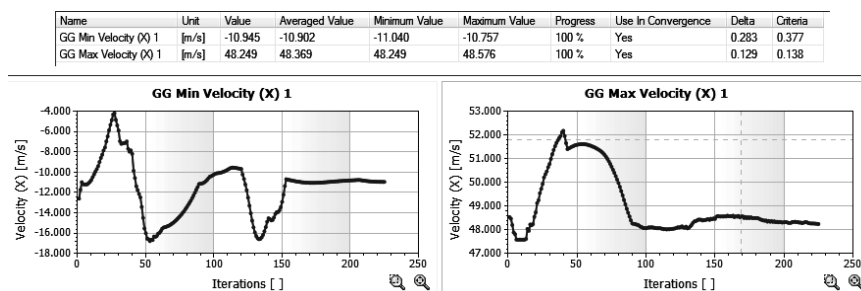


Рис. 10. Goal Plots: минимальное и максимальное значения осевой составляющей скорости

Дополнительно в среде SolidWorks Flow Simulation предусмотрена возможность создания в *Microsoft Word* отчета (*Report*) о выполненном расчете. Информация отчета может быть включена в существующий документ Word, либо может быть создан новый документ с этой информацией на базе стандартного или заданного пользователем шаблона.

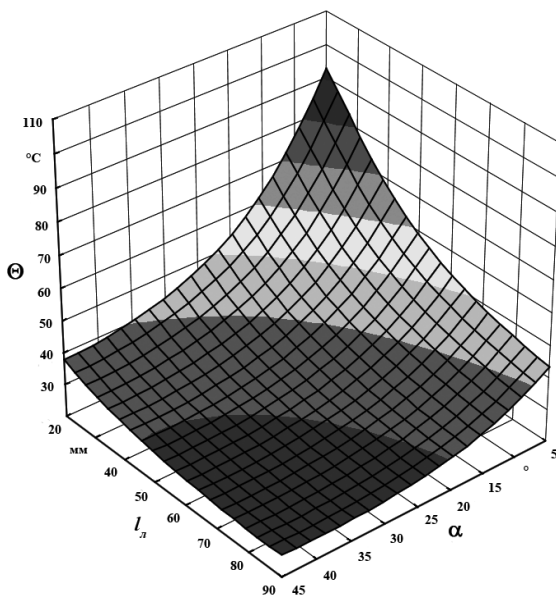
Отдельно стоит отметить широкие возможности SolidWorks Flow Simulation по созданию фильмов (*Animation*) для визуализации картины изменения параметров в пространстве и во времени. В фильме может быть задана одновременная анимация разных картин, а также анимация модели целиком (вращение, перемещение, масштабирование) или анимация вращения отдельных деталей модели.

При проектировании и исследовании совмещенных энергетических устройств возможности гидродинамического моделирования позволяют получить поля скоростей рабочей среды в канале СЭУ, а интерактивная визуализация результатов численного моделирования дает возможность полного и качественного анализа результатов. Визуализация позволяет не только наглядно представить результаты гидродинамического расчета, но и выполнить анализ исследуемых процессов, т.е. выступает в роли инструмента при исследовании и проектировании современных технических систем.

Результатом исследования является математическая модель, описывающая влияние проектных параметров исполнительного элемента СЭУ на выходные характеристики устройства - температуру и расход теплоносителя. Из всего перечня конструктивных параметров ИЭ СЭУ значимыми являются: угол установки лопасти, высота и длина лопасти, толщина корпуса ИЭ.

На рис. 11 показаны зависимость температуры теплоносителя от длины лопасти и угла ее установки (см. рис. 11, а) и влияние высоты лопасти и угла ее установки на расход теплоносителя (см. рис. 11, б).

а)



б)

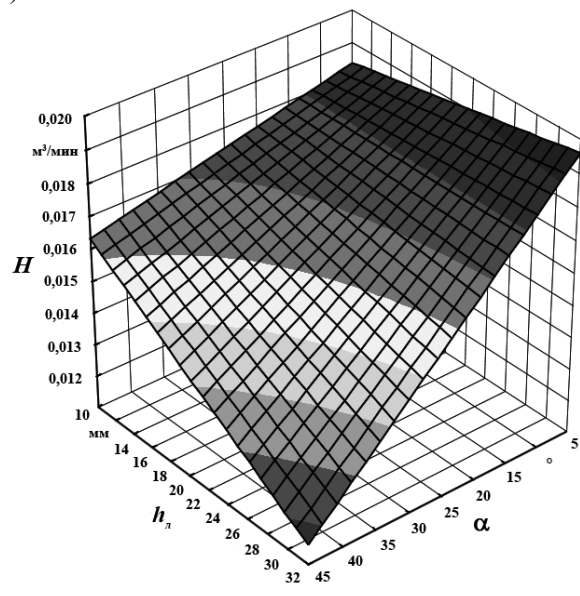


Рис. 11. Визуализация математической модели:

а – зависимость температуры теплоносителя от проектных параметров ИЭ СЭУ ( $\alpha$ ,  $l_n$ );

б – зависимость расхода теплоносителя от проектных параметров ИЭ СЭУ ( $\alpha$ ,  $h_n$ )

При увеличении угла установки лопасти  $\alpha$  в 9 раз (с  $5^\circ$  до  $45^\circ$ ) температура теплоносителя  $\Theta$  уменьшается в 2,45 раза (при длине лопасти  $l_n = 25$ ) и в 1,72 раза (при длине лопасти  $l_n = 88$ ). При увеличении длины лопасти  $l_n$  в 3,5 раз (с 25 до 88 мм) температура теплоносителя  $\Theta$  уменьшается в 2,16 раза (при угле установки лопасти  $\alpha = 5^\circ$  и в 1,5 раза (при угле установки лопасти  $\alpha = 45^\circ$ ).

При увеличении угла установки лопасти  $\alpha$  в 9 раз (с 5 до 45°) расход теплоносителя  $H$  уменьшается в 1,12 раза (при высоте лопасти  $h_l = 10$  мм) и в 1,77 раза (при высоте лопасти  $h_l = 32$  мм). При увеличении высоты лопасти  $h_l$  в 3,2 раз (с 10 до 32 мм) расход теплоносителя  $H$  (при угле установки лопасти 5°) практически не изменяется. При увеличении высоты лопасти  $h_l$  в 3,2 раз (с 10 до 32 мм) расход теплоносителя  $H$  (при угле установки лопасти 45°) уменьшается в 1,5 раза.

Таким образом, с использованием разработанной математической модели исследованы процессы массо- и теплообмена и решена задача определения выходных параметров устройства при варьировании проектных параметров исполнительного элемента СЭУ, а также реализована возможность определения проектных параметров, обеспечивающих заданные энергетические характеристики устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одицов, А. И. Харитонов, Н. Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
2. Корнух, А. В. Влияние размерных соотношений ферромагнитных элементов на выходные характеристики теплогенерирующих электромеханических преобразователей / А. В. Корнух, О. В. Приходченко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010. – № 5-6. – С. 35-39.
3. Пат. № 2451430 Российская Федерация, МПК Н 05 В 6/10. Устройство для нагрева и транспортирования жидкой среды / Приходченко О. В., Случанинов Н. Н., Иванов С. Н., Шпилев М. А., Ким К. К., Микеров А. Г.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ГОУВПО «КНАГТУ»). – № 2011106705/07; заявл. 22.02.2011; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14. – 6 с.
4. Приходченко, О. В. Использование электромеханических преобразователей в системах электронагрева / О. В. Приходченко // Дальневосточный энергопотребитель. – 2010. – № 6. – С. 68-71.
5. Приходченко, О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических теплогенерирующих преобразователях / О. В. Приходченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 27-37.
6. Приходченко, О. В. Моделирование напорных элементов электромеханических перекачивающих устройств в системе T-FLEX CAD / О. В. Приходченко, А. А. Просолович, И. А. Приходченко // САПР и графика. – 2012. – № 2. – С. 88-91.



Чье Ен Ун, Шейн А. Б., Шейн Е. Б.  
Chye En Un, A. B. Shein, E. B. Shein

## ТРАНЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ ПАЙКИ И МИКРОСВАРКИ

### TRANSISTOR CONVERTERS FOR RESISTANCE SOLDERING AND MICRO WELDING

**Чье Ен Ун** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и системотехники Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: chye@ais.khastu.ru

**Mr. Chye En Un** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Automation and System Engineering, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680035, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya street. E-mail: chye@ais.khstu.ru.

**Шейн Александр Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Чувашского государственного университета (Россия, Чебоксары); 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.

**Mr. Aleksandr B. Shein** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Industrial Electronics, the Chuvash Republic State University (Russia, Cheboksary); 428015, Chuvash Republic, city of Cheboksary, 15, Moskovsky Pr.

**Шейн Евгений Борисович** – старший энергетик ОАО «Водоканал» (Россия, Чебоксары); 428024, г. Чебоксары, пр. Мясокомбинатский, 12.

**Mr. Eugeny B. Shein** – Senior Energy Engineer, JSC «Vodokanal» (Russia, Cheboksary); 428024, Chuvash Republic, city of Cheboksary, 12, Myasokombinatsky Pr.

**Аннотация.** Рассматриваются особенности построения транзисторных преобразователей повышенной частоты для контактной пайки и микросварки.

**Summary.** The paper considers certain specific features of designing increased frequency transistor converters for resistance soldering and micro welding.

**Ключевые слова:** транзисторный преобразователь, пайка, микросварка.

**Key words:** transistor converter, resistance soldering, micro welding.

УДК 621.314.5

**Особенности преобразователей для контактной сварки и пайки.** Специфика технологических процессов контактной пайки и микросварки не позволяет использовать известные схемные решения силовых и управляющих частей полупроводниковых преобразователей без существенной их доработки по следующим причинам. Вследствие загрязнения, окисления свариваемых деталей или электродов в начальный момент сварки (пайки) контактное сопротивление может быть завышенным, вплоть до разрыва цепи. В процессе плавления металла и перемещения подвижного электрода также может нарушаться контакт. Следовательно, источник должен нормально работать при изменении сопротивления нагрузки в широких пределах вплоть до обрыва цепи нагрузки и при этом обеспечивать поддержание заданного параметра (тока, напряжения или мощности).

Для максимального уменьшения геометрических размеров сварочного контура, следовательно, его активного и индуктивного сопротивлений, мощности потерь сварочный трансформатор необходимо максимально приблизить к рабочему инструменту, конструктивно

вынося его за пределы источника тока. Поэтому преобразователь должен представлять собой инвертор повышенной частоты (800 – 1000 Гц для микросварки, 20 – 30 кГц для пайки [10]). Для защиты от короткого замыкания необходим последовательно включенный дроссель, ограничивающий скорость нарастания и амплитуду тока в ключевых силовых компонентах преобразователей в течение времени срабатывания защиты по току, которой должна быть снабжена система управления преобразователем источника.

При выключении ключевых силовых компонентов и отсутствии нагрузки преобразователя, энергию, накопленную в индуктивностях дросселя и трансформатора, необходимо вернуть в источник питания.

В источниках для пайки, работающих на частоте 20 – 30 кГц, выходной трансформатор встраивается в инструмент для пайки, рабочие электроды которого образуют вторичную обмотку. Поэтому для уменьшения габаритов и массы инструмента и повышения удобства работы с ним выходной трансформатор должен иметь первичную обмотку с возможно меньшим числом витков и без отводов.

Источники для микросварки и пайки работают в повторно-кратковременном режиме, что позволяет использовать более напряженный режим работы силовых ключевых компонентов. На систему управления двухтактным источником указанный режим накладывает требование обеспечения симметричного перемагничивания сердечника сварочного трансформатора во избежание его насыщения.

**Однотактные преобразователи.** Разработан однотактный преобразователь, отвечающий всем вышеперечисленным требованиям [5, 6, 18], изображенный на рис. 1 в двух вариантах *a* и *б* на напряжения питания 220 и 380 В и различную мощность. Интервалы работы обоих вариантов преобразователя одинаковы. Рассмотрим их на примере варианта *a*.

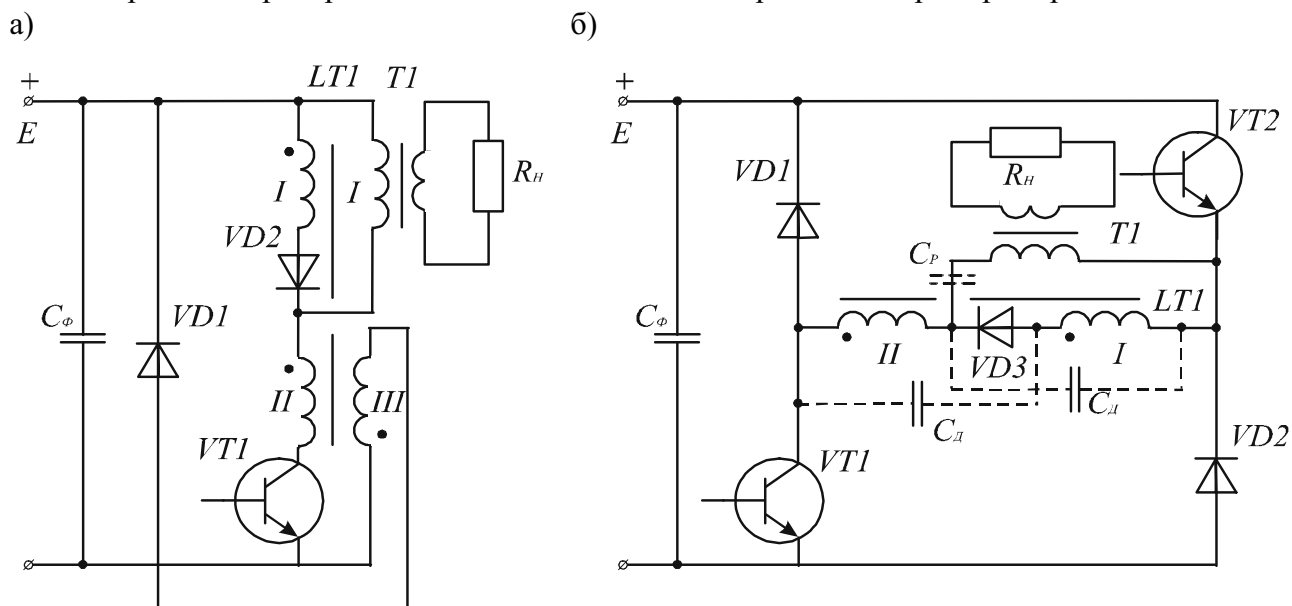
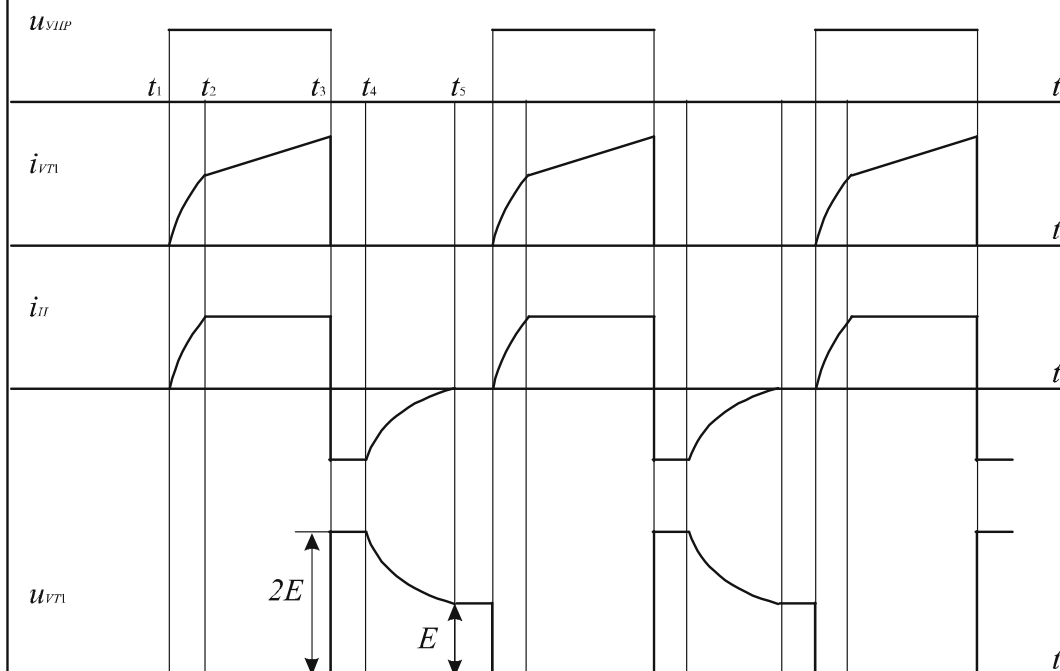


Рис. 1. Однотактные преобразователи

Обмотки I и II дроссель-трансформатора  $LT1$  имеют равное число витков, а обмотка III – вдвое большее. В момент времени  $t_1$  сигналом управления  $u_{упр}$  (см. рис. 2, *a*) включается транзистор  $VT1$ . Напряжение питания  $E$  создает в обмотке II дроссель-трансформатора  $LT1$  ток, протекающий через первичную обмотку I выходного трансформатора  $T1$ . Диод  $VD2$  заперт напряжением на обмотке I дроссель-трансформатора  $LT1$  до момента  $t_2$ , в который напряжение на обмотках I и II дроссель-трансформатора не упадет до половины напряжения питания. При этом ток в приведенном сопротивлении  $R'_н$  нагрузки, нарастая по экспоненте, достигнет значения  $E/2R'_н$ .

a)



б)

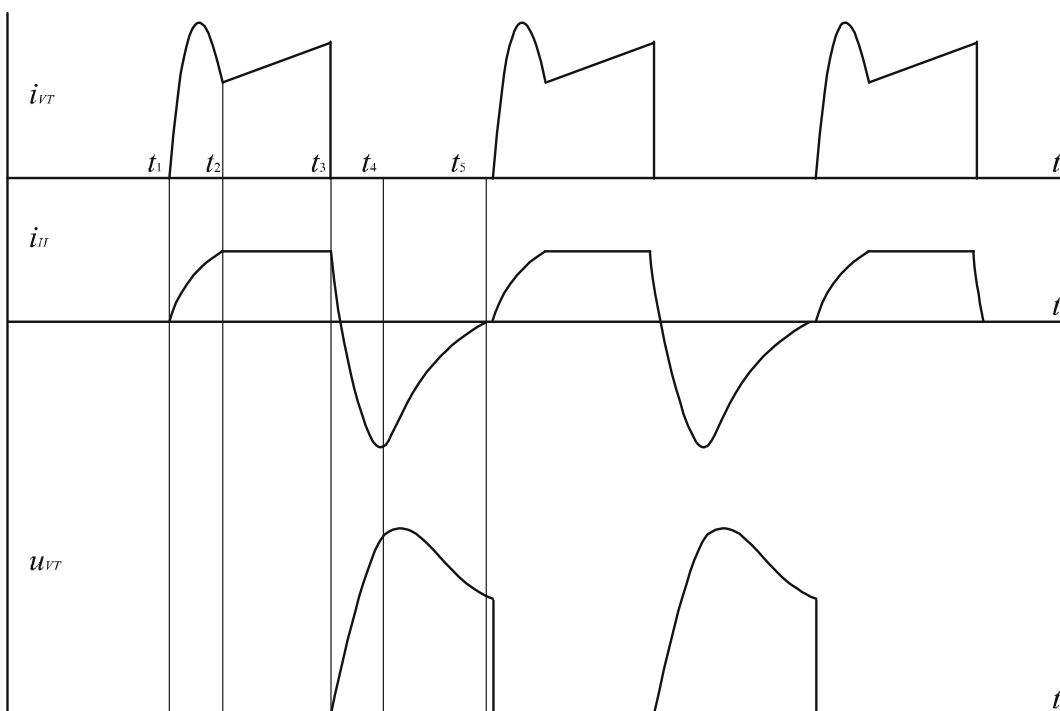


Рис. 2. Диаграммы работы улучшенных одноктных преобразователей

Диод  $VD2$  далее остается открытым до момента  $t_3$  выключения транзистора  $VT1$ . На интервале  $t_2-t_3$  к последовательно соединенным обмоткам I и II дроссель-трансформатора  $LT1$  приложено напряжение питания, под действием которого ток в них нарастает линейно, а ток нагрузки  $i_H$  остается постоянным. После выключения транзистора  $VT1$  в момент  $t_3$  на обмотках I, II, III дроссель-трансформатора  $LT1$  возникает ЭДС самоиндукции, которая при сопротивлении нагрузки, большем определенного значения, может превысить на обмотке III

напряжение питания. При этом открывается диод  $VD1$  (диоды  $VD1, VD2$  – см. рис. 2, б), сохраняя на обмотке III и последовательно включенных обмотках I и II напряжение питания, но противоположной полярности, до момента  $t_4$ .

Отрицательная полуволна тока нагрузки и напряжения на обмотках выходного трансформатора, перемагничивающая его сердечник в обратном направлении, создается за счет энергии, накопленной в индуктивности дроссель-трансформатора  $LT1$  на интервале  $t_1 - t_3$  включенного состояния транзистора  $VT1$ .

При коротком замыкании в цепи нагрузки, напряжение питания прикладывается к обмотке II дроссель-трансформатора, а диод  $VD2$  ( $VD3$  – см. рис. 2, б) заперт напряжением на обмотке I, поэтому такой режим не является аварийным.

Практическая схема улучшенного однотактного преобразователя отличается наличием цепи уменьшения динамических потерь при выключении транзисторов  $VT1, VT2$  и разделительного конденсатора  $C_p$ , выделенных на рис. 2, б пунктирными линиями. Наиболее простая цепь уменьшения динамических потерь образована конденсаторами  $C_d$  малой емкости [5].

Конденсаторы  $C_d$  заряжаются до напряжения  $E/2$  через полуобмотки I, II дроссель-трансформатора  $LT1$  при включении транзисторов  $VT1, VT2$ , дополнительно загружая их током заряда ( $i_{VT}$  – см. рис. 2, б). При выключении транзисторов  $VT1, VT2$  в момент времени  $t_3$  конденсаторы  $C_d$  начинают перезаряжаться за счет ЭДС самоиндукции обмоток I, II дроссель-трансформатора  $LT1$ , ограничивая скорость нарастания напряжения на транзисторах, уменьшая потери в транзисторах на этапе их выключения и повышая надежность преобразователя, работающего на повышенной частоте (20 – 30 кГц).

Интервалы работы устройства те же, что и у вышеописанного преобразователя.

**Транзисторный ключ.** При разработке транзисторных преобразователей повышенной частоты актуальна проблема снижения динамических потерь в транзисторных ключах, решение которой позволяет повысить надежность устройств.

Разработан универсальный транзисторный ключ (см. рис. 3) с уменьшенными динамическими потерями как при включении, так и при выключении транзистора [5] по сравнению с известными.

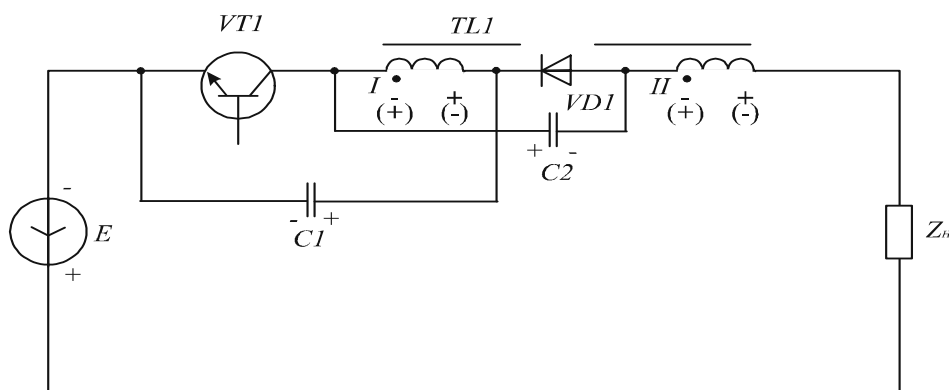


Рис. 3. Транзисторный ключ

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии силовой транзистор  $VT1$  закрыт, диод заперт напряжением на дополнительном конденсаторе  $C2$ , конденсатор  $C1$  заряжен до суммы напряжений на источнике питания  $E$  и на конденсаторе  $C2$ . В начальный момент при отпирании силового транзистора  $VT1$  к первой обмотке I магнитного реактора  $TL1$  прикладывается напряжение конденсатора  $C1$ , которое трансформируется с коэффициентом трансформации во вторичную обмотку II и вычитается из напряжения источника питания, сложенного с напряжением на дополнительном конденсаторе  $C2$  (полярность напряжений указана без скобок). Поэтому ток силового транзистора  $VT1$  плавно от нуля нарастает по синусоидальному закону, определяемому колебательным контуром, состоящим из конденсато-

ра  $C1$  и обмотки I магнитного реактора  $TL1$ . На указанном этапе работы устройства происходит разрядка конденсатора  $C2$  током транзистора  $VT1$ .

Когда напряжение на конденсаторе  $C1$  и на обмотке магнитного реактора  $TL1$  достигает остаточного напряжения на конденсаторе  $C2$ , которое мало отличается от нулевого значения, так как емкость конденсатора  $C2$  выбирается существенно больше, чем конденсатора  $C1$ , открывается диод  $VD1$  и энергия, накопленная в индуктивностях магнитного реактора, начинает подзаряжать дополнительный конденсатор  $C2$  (полярность напряжения на обмотках указана в скобках), а ток нагрузки продолжает разряжать конденсатор  $C2$ . Появляется режим, близкий к тому, когда обмотка I магнитного реактора  $TL1$  замкнута накоротко, поэтому индуктивность намагничивания реактора практически не оказывает влияния на ток транзистора, который с малой задержкой достигает тока нагрузки, который протекает под действием напряжения на дополнительном конденсаторе  $C2$ , и такого же напряжения на вторичной обмотке магнитного реактора  $TL1$ . Таким образом, осуществляется передача энергии, запасенной в конденсаторе  $C1$  в нагрузку.

После запираания силового транзистора  $VT1$  остаток энергии магнитного реактора передается конденсатору  $C2$  по колебательному закону контура, образованному с индуктивностью первой обмотки I магнитного реактора. Одновременно конденсатор  $C1$  заряжается до исходного напряжения индуктивностями нагрузки и рассеяния второй обмотки II магнитного реактора. Затем диод  $VD1$  закрывается. Условием нормальной работы устройства является запираание диода  $VD1$  ко времени очередного открытия силового транзистора  $VT1$ .

**Однотактный инвертор с формирователем траектории выключения транзисторов.** Способ разрядки конденсаторов, формирующих траекторию выключения силовых транзисторов током нагрузки, позволяет реализовывать однотактный и двухтактный преобразователи, в которых силовые транзисторы не загружаются дополнительно током разряда. На рис. 4 изображена схема однотактного инвертора для микросварки и пайки, в котором реализован указанный способ [8].

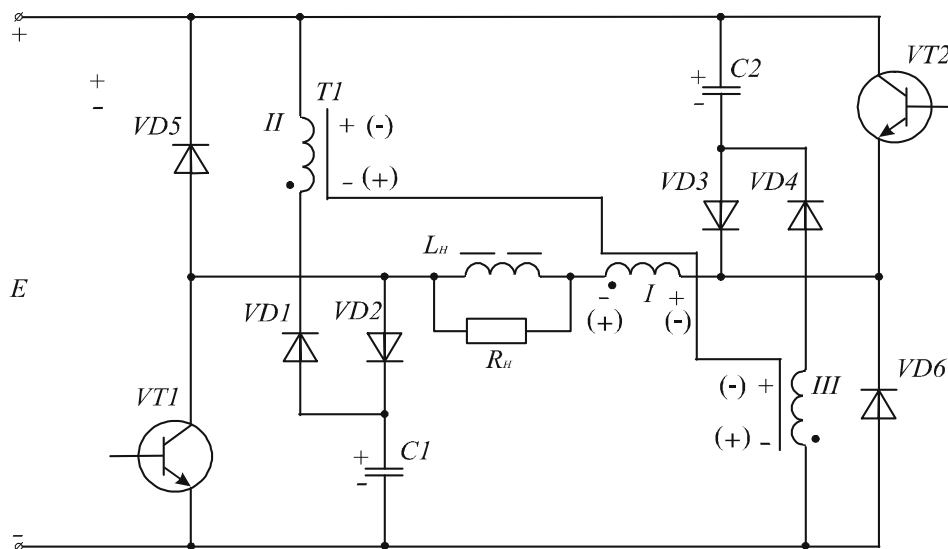


Рис. 4. Однотактный инвертор с формирователем траектории выключения транзисторов

Инвертор работает следующим образом. В исходном состоянии конденсаторы  $C1$  и  $C2$  заряжены до напряжения на входе преобразователя. Рекуперационные диоды  $VD5$ ,  $VD6$  закрыты. В некоторый момент времени при включении транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  входное напряжение прикладывается к последовательно соединенным обмоткам  $L_n$  и I трансформатора тока  $T1$ . Начальное напряжение на обмотках II и III трансформатора тока  $T1$ , равное входному напряжению минус такое же напряжение на конденсаторах  $C1$ ,  $C2$ , равно нулю.

Следовательно, начальное напряжение на обмотке I трансформатора тока также равно нулю, и все входное напряжение приложено к обмотке  $L_n$  и нагрузке. Ток обмотки I трансформатора тока  $T1$ , складывающийся из тока нагрузки и тока намагничивания выходного трансформатора  $L_n$ , трансформируясь в обмотки II и III, разряжает конденсаторы  $C1$  и  $C2$ . Напряжение на обмотках трансформатора тока  $T1$  постепенно возрастает, а на нагрузке – несколько уменьшается.

Когда напряжение на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  становится равным нулю, напряжение на обмотках II и III трансформатора тока поддерживается равным входному через открывшиеся в этот момент диоды  $VD2$  и  $VD3$  до момента насыщения сердечника трансформатора тока  $T1$ . После этого диоды  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ ,  $VD4$  закрываются, и трансформатор тока не влияет на работу устройства.

При выключении транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  энергия, запасенная в индуктивности трансформатора тока и частично в выходном трансформаторе, возвращается в источник питания через открывшиеся за счет ЭДС самоиндукции указанных индуктивностей диоды  $VD5$  и  $VD6$ .

Таким образом, повышается КПД и надежность предлагаемого инвертора за счет снижения потерь при выключении силовых транзисторов и отсутствия загрузки транзисторов током разрядки формирующих конденсаторов  $C1$  и  $C2$  по сравнению с известными устройствами [11].

**Двухтактный инвертор с формирователем траектории выключения транзисторов.** Способ разряда конденсаторов силовым током нагрузки может быть реализован и в двухтактном преобразователе (см. рис. 5) [9].

В исходном состоянии конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  разряжены. При включении транзисторного ключа  $VT1$  к нагрузке  $R_n$  через трансформатор  $T2$  прикладывается напряжение конденсатора  $C3$ . Ток нагрузки через трансформатор тока  $T1$  и выпрямительный мост заряжает конденсатор  $C2$  до суммы напряжений на конденсаторе  $C4$  и нагрузки, т.е. до уровня входного напряжения преобразователя. При этом конденсатор  $C1$  цепочки, шунтирующей открытый транзистор  $VT1$ , не заряжается.

После выключения ключа  $VT1$  напряжение на нем начинает плавно нарастать по мере разряда конденсатора  $C2$  за счет ЭДС самоиндукции цепи нагрузки от нуля до величины входного напряжения. Этим достигается смещение во времени спада тока и фронта напряжения на ключе  $VT1$ , что ведет к уменьшению динамических потерь в нем. При включении и выключении ключа  $VT2$  происходят аналогичные процессы.

То, что силовые транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  дополнительно не загружаются током перезарядки формирующих конденсаторов  $C1$  и  $C2$ , позволяет повысить надежность и КПД преобразователя, по сравнению с известными решениями [11, 15].

**Магнитно-транзисторный ключ.** В двухтактных и однотактных инверторах источников тока для микросварки и пайки время включенного состояния транзисторов незначительно, поэтому целесообразно использовать наиболее экономичное и простое пропорционально-токовое управление силовыми высоковольтными биполярными транзисторами, обеспечивающее одновременно гальваническую развязку силовых цепей и цепей управления за счет трансформатора тока.

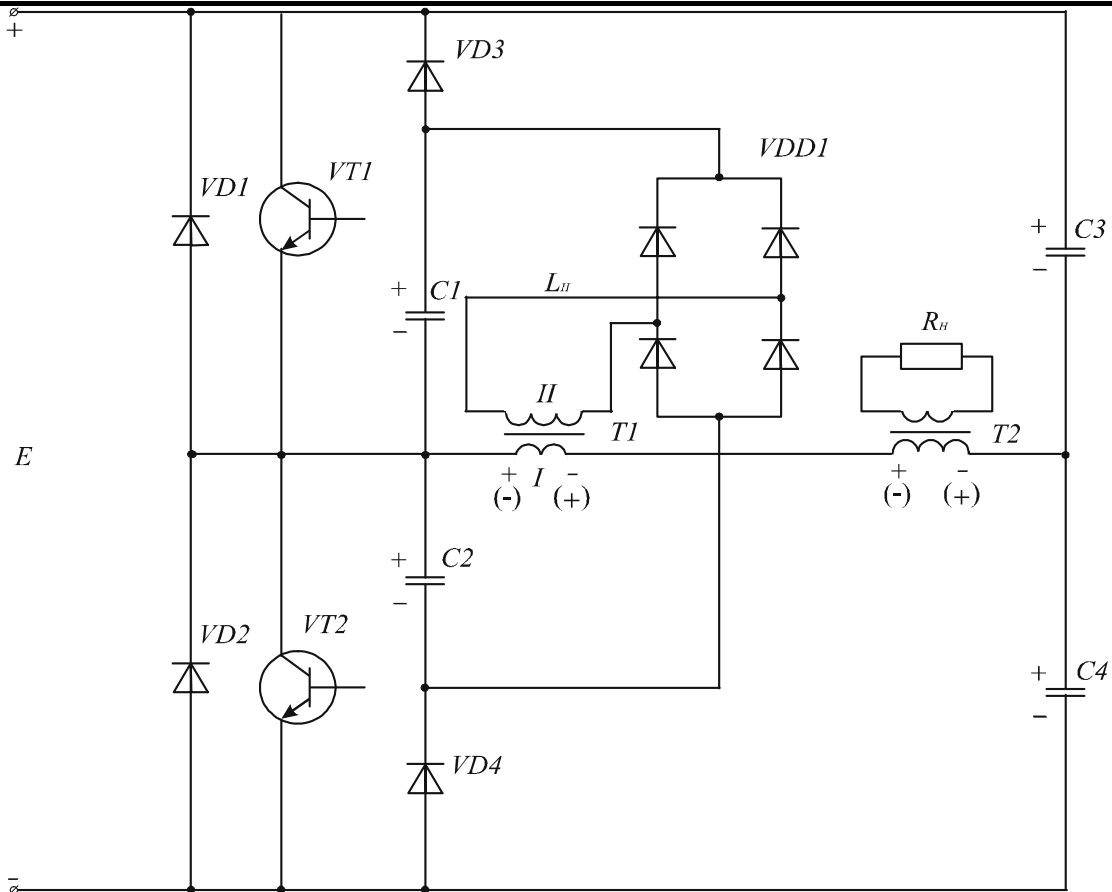


Рис. 5. Двухтактный инвертор с формирователем траектории выключения транзисторов

Разработан упрощенный вариант магнитно-транзисторного ключа [7] по сравнению с известными [11, 15], принципиальная схема которого приведена на рис. 6.

В исходном состоянии управляющий транзистор  $VT1$  открыт сигналом управления. Напряжение  $E$  источника питания создает размагничивающий ток. Силовой транзистор  $VT2$  закрыт. В некоторый момент времени запирается управляющий транзистор  $VT1$ . Энергия, запасенная в магнитопроводе трансформатора тока  $T1$ , создает при этом отпирающий базовый ток силового транзистора  $VT2$ , поддерживаемый ЭДС самоиндукции обмотки III (полярность указана без скобок) трансформатора тока. Через выходные клеммы силового транзистора  $VT2$  и обмотку положительной обратной связи IV начинает протекать ток, лавинообразно насыщая силовой транзистор.

Этапу рассасывания избыточных носителей в базе силового транзистора предшествует процесс перезаряда емкости база-эмиттер транзистора. При этом на обмотках трансформатора тока еще сохраняется напряжение, полярность которого указана без скобок (обратное напряжение на эмиттерном переходе) (см. рис. 6). Это напряжение является запирающим и для диода  $VD1$ , поэтому ток от источника питания протекает по последовательной цепи из резистора  $R1$ , обмоток I и II, диода  $VD2$ , резистора  $R2$  и, трансформируясь в обмотку III, способствует быстрому разряду емкости перехода, т.е. ускоренному выключению. Амплитуда тока рассасывания определяется суммарным сопротивлением резисторов  $R1$  и  $R2$ . Этап рассасывания заканчивается отпиранием диода  $VD1$ , приводящим к запираению диода  $VD2$ .

На этапе спада тока силового транзистора управляющий ток протекает по последовательной цепи из резистора  $R1$ , обмотки I, диода  $VD1$ , насыщенного транзистора  $VT1$ . Число витков обмотки I и сопротивление резистора  $R1$  выбираются по возможности малыми, для

обеспечения быстрого размагничивания сердечника трансформатора тока и надежного записывания силового транзистора достаточно большим запирающим напряжением база-эмиттер.

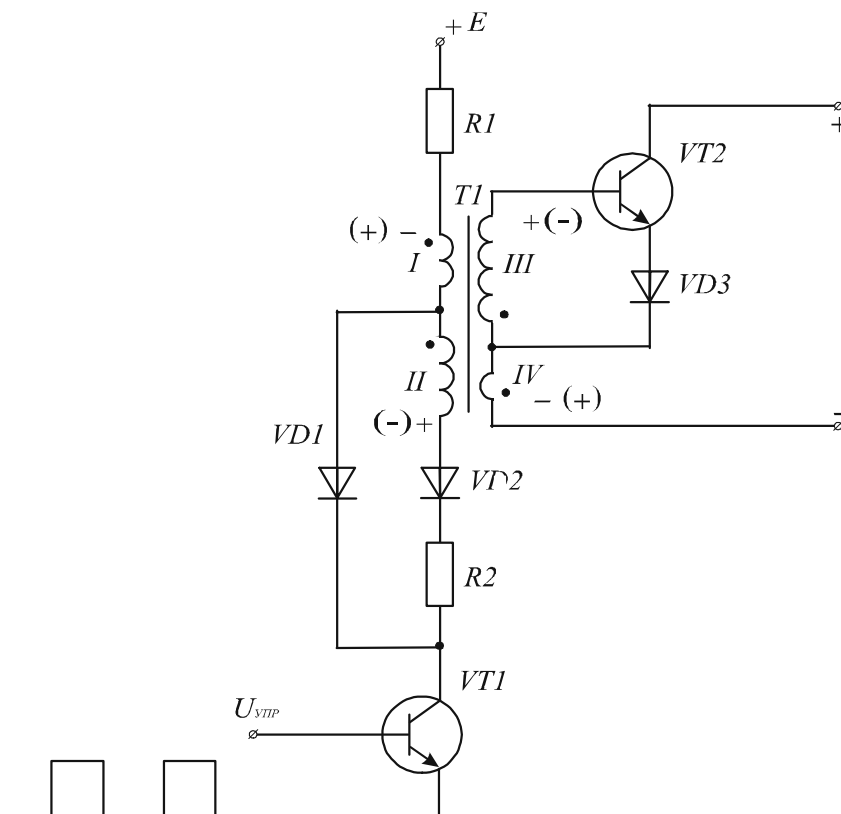


Рис. 6. Магнитно-транзисторный ключ

Для повышения надежности работы силового транзистора путем снижения вероятности вторичного пробоя, обусловленного динамическими потерями в структуре транзистора при переключении, необходимо определенным образом формировать ток базы [16]. В эмиттерную цепь силового транзистора  $VT2$  может быть включен быстродействующий диод  $VD3$ , рассасывание носителей в котором происходит значительно быстрее, чем в эмиттерном переходе, обеспечивающий режим псевдообрыва эмиттера и дополнительно повышающий устойчивость ключа ко вторичному пробую. При включении диода  $VD3$  ток рассасывания  $I_3$  может быть задан значительно большей величины, чем указано выше, для повышения быстродействия ключа с дополнительным повышением надежности.

**Датчики электрических режимов микросварки и пайки.** Многообразие ассортимента свариваемых деталей требует стабилизации в ходе технологического процесса различных электрических режимов работы преобразователей: действующего или среднего значения тока в рабочем контуре; напряжения на свариваемых деталях; активной мощности или энергии, выделяющейся в зоне сварки (пайки) [12, 14]; сопротивления сварочного контакта [13]; какой-либо совокупности параметров [3, 17].

Измерение сварочного тока не вызывает затруднений и может быть реализовано трансформатором тока, безындуктивным шунтом или поясом Роговского с интегратором [1].

Наиболее просто реализуется косвенное измерение напряжения на свариваемых деталях, при котором измеряется напряжение на выводах вторичной обмотки сварочного трансформатора или в доступном месте токовых шин и из него вычитается падение напряжения на паразитных параметрах сварочного контура [2, 4].

Схема замещения сварочного контура приведена на рис. 7. Напряжение  $u$  измеряется в произвольных точках сварочных шин. Необходимо выделить напряжение  $u_C$  на свариваемых деталях. По второму закону Кирхгофа можно записать:

$$u = i_C R_K + L_K \frac{di_C}{dt} + i_C R_C . \quad (1)$$

Сигнал производной сварочного тока может быть получен с пояса Роговского, что предопределяет способ измерения сварочного тока  $i_C$ .

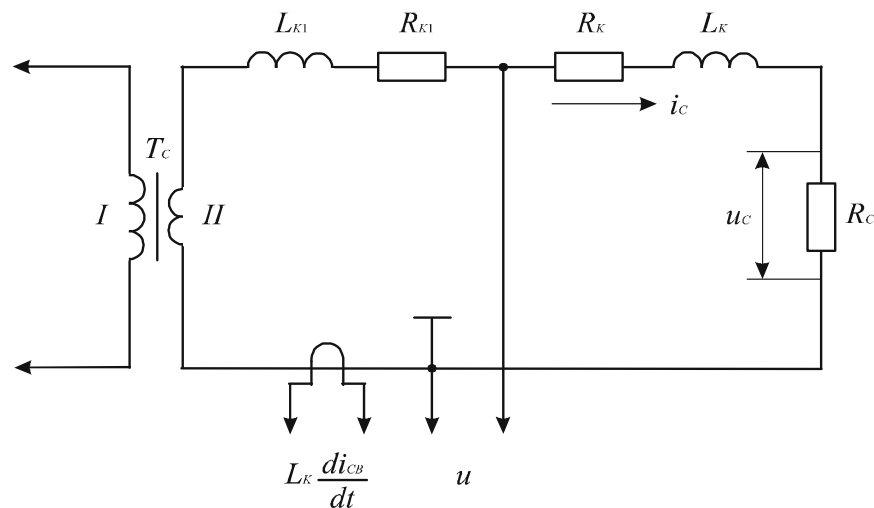


Рис. 7. Получение информации от сварочного контура

Преобразуем уравнение (1) к виду, удобному для практической реализации (см. рис. 8):

$$u_C = i_C R_C = u - L_K \frac{di_C}{dt} - i_C R_K .$$

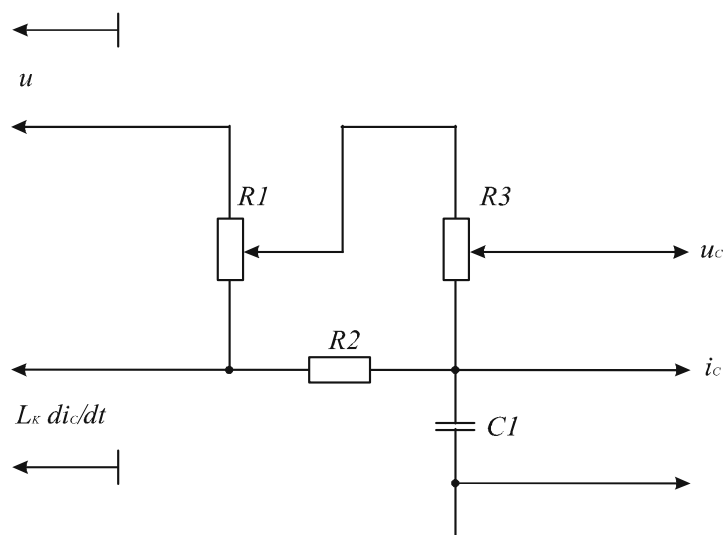


Рис. 8. Определение напряжения на свариваемых деталях

В результате вычитания токов на масштабируемом резисторе  $R1$  на его движке выделяется сигнал, пропорциональный  $(R_K + R_C)i_C$ , из которого на резисторе  $R3$  вычитается сигнал, пропорциональный  $R_K i_C$ , снимаемый после интегрирования с конденсатора  $C1$ . С

движка резистора  $R3$  снимается сигнал, пропорциональный напряжению на свариваемых деталях, а с конденсатора  $C1$  – пропорциональный сварочному току. После усиления указанные сигналы используются в системе управления, а после перемножения – для выделения сигнала мгновенного значения активной мощности, интегрированием которого может быть оценена энергия, выделяющаяся в зоне сварки [14].

По предложенным схемам были изготовлены и успешно испытаны транзисторные преобразователи со схемами контроля и управления на токи до 200 А.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. СССР № 742073 В23К11/24. Устройство для измерения сварочного тока / Ю. А. Петров, Чье Ен Ун. – № 2608533/25-27; заявл. 24.04.78; опубл. 25.06.80. Бюл. № 23.
2. А. с. СССР № 764895 В23К11/24. Устройство для измерения напряжения на сварочных электродах / Ю. А. Петров, А. И. Комарчев, Чье Ен Ун. – № 2632270/25-27; заявл. 26.06.78; опубл. 23.10.80. Бюл. № 35.
3. А. с. СССР № 829369 В23К11/24. Устройство для контроля качества точечной контактной сварки / О. В. Белых, А. С. Васильев, Чье Ен Ун [и др.]. – № 2699292/25-27; заявл. 19.12.78; опубл. 15.05.81. Бюл. № 18.
4. А. с. СССР № 998055 В23К11/24. Устройство для измерения активного сопротивления сварочного контура / Ю. А. Петров, В. С. Федорова, Чье Ен Ун. – № 3345976/25-27; заявл. 06.10.81; опубл. 07.08.81. Бюл. № 7.
5. А. с. СССР № 1200371 Н02М7/537; Н03К17/60. Транзисторный ключ / Е. Б. Шеин, А. Б. Шеин, В. М. Яров. – № 3689893/24-21; заявл. 09.01.84; опубл. 23.12.85. Бюл. №47.
6. А. с. СССР № 1300613 Н02Б7/5395. Однотактный инвертор / Е. Б. Шеин, А. Б. Шеин, В. М. Яров. – № 3968135/24-07; заявл. 24.10.85; опубл. 30.03.87. Бюл. № 12.
7. А. с. СССР № 1368972 Н03 К17/60. Транзисторный ключ / Н. Н. Богданов, Е. Б. Шеин, А. Б. Шеин, В. М. Яров. – № 4124564/24-21; заявл. 10.07.86; опубл. 23.01.88. Бюл. №3.
8. А. с. СССР № 1453560 Н02М7/537. Однотактный транзисторный инвертор / В. И. Костылев, В. М. Яров, Е. Б. Шеин, А. Б. Шеин. – № 4277926/24-07; заявл. 15.06.87; опубл. 23.01.89. Бюл. № 3.
9. А. с. СССР № 1757070 Н02 М7/5387. Преобразователь постоянного напряжения / А. Б. Шеин, Е. Б. Шеин. – № 4886591/07; заявл. 28.11.90; опубл. 23.08.92. Бюл. №31.
10. Львов, Н. С. Автоматика и автоматизация сварочных процессов / Н. С. Львов, Э. А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1982.
11. Моин, В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В. С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
12. Петров, Ю. А. Анализ эффективности дозирования энергии для повышения качества контактной точечной электросварки / Ю. А. Петров, Чье Ен Ун // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1979. – Вып. 5(56). – С. 10-11.
13. Петров, Ю. А. Датчик сопротивления участка электрод-электрод при контактной сварке / Ю. А. Петров, Чье Ен Ун // Сварочное производство. – 1980. – № 8. – С. 35-36.
14. Петров, Ю. А. Измерительный преобразователь энергии для контактных точечных машин // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1979. – вып. 1(52). – С. 14-16.
15. Розанов, Ю. К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты / Ю. К. Розанов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
16. Рудский, В. А. Быстродействие и надежность работы высоковольтных силовых транзисторов: межвуз. сб. / В. А. Рудский // Полупроводниковые устройства преобразовательной техники. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1985.
17. Система активного контроля качества контактной точечной сварки на базе математической модели сварочного процесса / А. С. Васильев, О. В. Белых, Чье Ен Ун [и др.] // Автоматическая сварка. – 1980. – № 5(326). – С. 42-44.
18. Чье Ен Ун. Решение уравнений состояния в задачах схемотехнического моделирования при произвольных воздействиях / Чье Ен Ун, А. Б. Шеин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 45-51.

Кудряшова Е. С.  
E. S. Kudryashova

**ПРИМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ  
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ**

**APPLICATION OF TIME PETRI NETS TO THE DEVELOPMENT OF REAL TIME  
SYSTEMS FOR OBJECTS' STATUS MONITORING**



**Кудряшова Екатерина Сергеевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27; 89638209000. E-mail: ekatt@inbox.ru.

**Ms. Ekaterina S. Kudryashova** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr.; +7 963 8209000. E-mail: ekatt@inbox.ru

**Аннотация.** Работа посвящена применению временных сетей Петри для создания программного обеспечения мониторинга группы виртуальных машин с использованием QNX Neutrino RTOS. В работе рассматривается сущность временных сетей Петри, их использование для моделирования систем, успешность работы которых зависит от времени. В работе моделируется функционирование системы мониторинга в нотации временных сетей Петри, рассматривается алгоритм разработки программного обеспечения для отслеживания работы сети, с возможностью получения результатов в режиме реального времени.

**Summary.** This paper deals with the issue of using Time Petri Nets to develop software for monitoring virtual machines using QNX Neutrino RTOS. The paper considers the nature of time Petri nets and the issue of their application to modeling systems whose success is time-dependent. The operation of a monitoring system in the notation of Time Petri Nets is simulated, and the algorithm of developing specialized software to monitor the network with the opportunity of obtaining real time results is examined.

**Ключевые слова:** временные сети Петри, система мониторинга сети, моделирование, системы реального времени, временные дистрибутивные асинхронные автоматы.

**Key words:** Time Petri Nets, network monitoring system, simulation, real-time systems, distributed time asynchronous automata

УДК 681.3.06

**Введение**

Для описания и исследования поведения параллельных систем [7] в настоящее время широко используются различные математические структуры, такие как временные системы переходов [10], временные структуры событий [1], временные системы переходов с независимостью [4], временные сети Петри [2; 3; 6; 9].

На первый взгляд понятия времени и параллелизма имеют не много общего. Однако существует большое количество примеров из разных областей, иллюстрирующих эту связь. По этой причине было введено и изучено множество различных сетей Петри, зависящих от времени [12]. Для моделирования работы системы мониторинга в данной статье применяются временные сети Петри. Этот класс сетей является производным от классических сетей Петри. Преимущество моделирования в нотации временных сетей Петри заключается в наглядности разрабатываемой математической модели, простоте и однозначности интерпре-

тации. В отличие от других моделей, использующихся для моделирования систем реального времени, во временных сетях Петри моделируется не только множество различных состояний системы, но и переходы из одного состояния в другое. Также временные сети Петри позволяют однозначно определить порядок срабатывания переходов с помощью разметки.

Помимо математической модели в статье описывается программное обеспечение мониторинга группы виртуальных машин, разработанное на базе операционной системы реального времени. Известно, что в настоящее время на рынке существует множество систем мониторинга сети. Проблема заключается в том, что ни одна из них не работает в режиме реального времени, так необходимом для получения точных результатов и своевременного выявления неисправностей. В этой связи возникла потребность в написании системы мониторинга сети на базе операционной системы жесткого реального времени QNX Neutrino, сочетающей в себе все свойства, необходимые для качественного отслеживания работы сети, с возможностью получения результатов в режиме реального времени. Такой режим подразумевает отсутствие отказов системы, «зависаний», жесткий контроль сбоев в работе. Приложения, разработанные на базе операционных систем реального времени, отличаются очень высокими показателями надежности и непрерывности управления, времени реакции на аварийные ситуации. Разработанное программное обеспечение призвано снизить трудоемкость работ по мониторингу сети, сократить время выявления неисправностей, и, главное, увеличить отказоустойчивость системы мониторинга сети.

### Временные сети Петри

Временная сеть Петри – это шестиэлементный кортеж

$$\mathcal{N} = (P, T, F, m^0, Eft, Lft),$$

где  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  – конечное множество позиций;  $T = \{t_1, \dots, t_n\}$  – конечное множество переходов;  $F: (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$  – отношение инцидентности;  $m^0: P \rightarrow \mathbb{N}$  – начальная маркировка;  $Eft: T \rightarrow \mathbb{N}$ ,  $Lft: T \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  – функции, описывающие соответственно раннее и позднее время доступности переходов, которые удовлетворяют ограничению  $Eft(t) \leq Lft(t)$  для каждого  $t \in T$  [11].

Функция  $F$  определяет структуру ориентированного графа, множеством вершин которого является  $P \cup T$ , а стрелками – пары  $(a, b) \in (P \times T) \cup (T \times P)$ . Состояния сети Петри задаются разметками, которые получаются из начальной разметки с помощью срабатывания конечных последовательностей переходов. Переход  $t$  является доступным, если  $\forall (p \in P) m^0(p) \geq F(p, t)$  и время, прошедшее с момента доступности перехода  $t$ , достигло значения  $Eft$ .

Раннее и позднее время доступности перехода  $t$  соответствует временному интервалу, в который переход  $t$  может сработать. Если же время, прошедшее с того момента, когда переход  $t$  стал доступен, достигло значения  $Lft(t)$ , то переход может сработать до тех пор, пока не будет заблокирован срабатыванием другого перехода.

### Математическая модель

На рис. 1 изображена временная сеть Петри, моделирующая работу системы мониторинга сети.

Представленная математическая модель сочетает в себе клиентскую и серверную части. Каждому переходу в сети назначен определенный временной интервал. При этом используются буквы латинского алфавита как обозначение определенного известного значения времени, знак бесконечности и дельта – для обозначения небольшого значения времени. Интервалы, ограниченные справа бесконечностью, означают, что данное действие не является критическим по времени, оно может происходить долго, и оно обязательно произойдет.

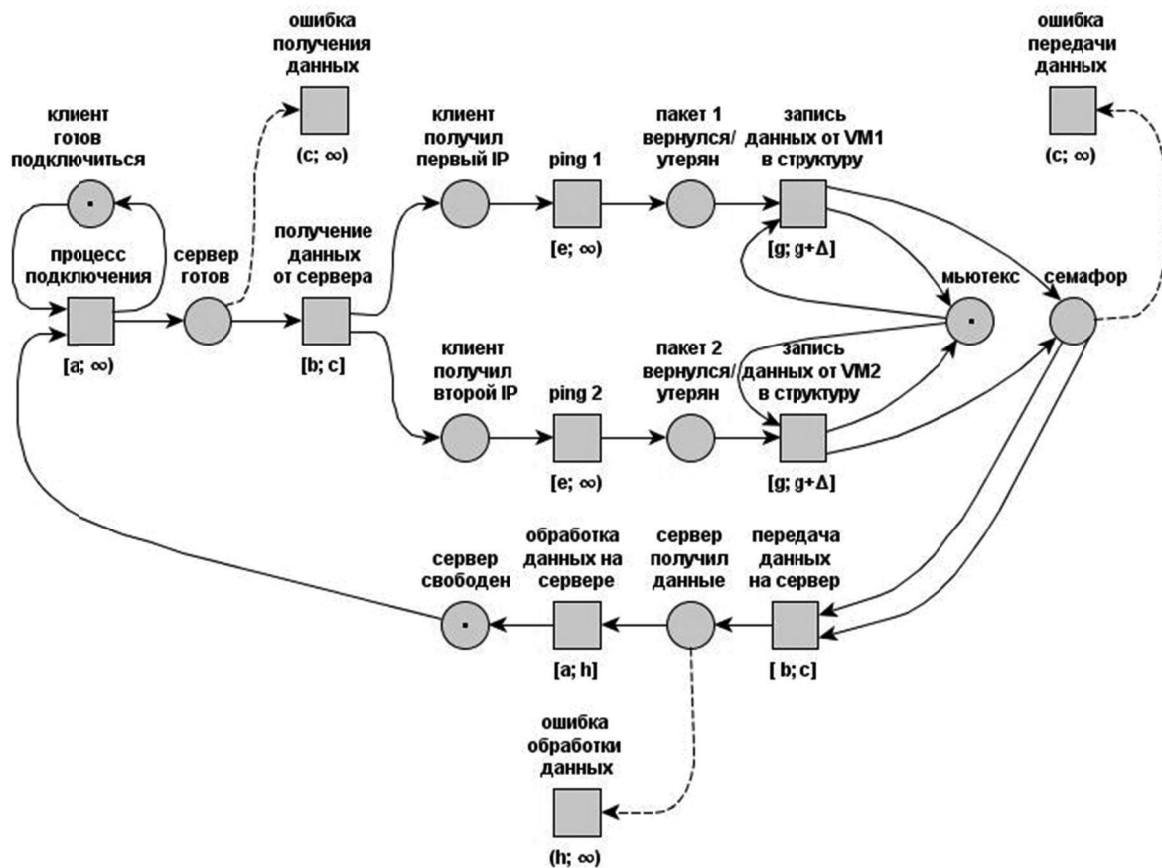


Рис. 1. Временная сеть Петри

Работа сети начинается с перехода *процесс подключения*. Он может сработать в интервале  $[a; \infty)$ , при условии, что *клиент готов* и *сервер свободен*. Под этим подразумевается, что для подключения необходимо, чтобы клиент был запущен, а все операции по обработке данных на сервере к началу нового цикла мониторинга должны быть завершены.

Когда процесс подключения завершен, то есть одноименный переход сработал, сервер готов передать клиенту данные. Переход *получение данных от сервера* может сработать в интервале  $[b; c]$ . Если данные по какой-то причине не были получены, программа завершается с ошибкой (*ошибка получения данных*). Ошибки, связанные с невозможностью уложиться в заданное время, могут возникать только на стороне сервера. На стороне клиента это невозможно, так как QNX является надежной отказоустойчивой системой. После того, как клиент получил IP-адреса, он приступает к мониторингу. На рис. 1 изображена сеть Петри для мониторинга двух виртуальных машин. Мы видим два независимых потока, в каждом из которых осуществляется *ping*. Следует указать, что сеть для мониторинга большего числа виртуальных машин строится аналогично путем добавления неограниченного числа новых блоков от получения IP до записи данных в структуру. *Ping* может закончиться возвратом или потерей пакета (*пакет вернулся/утерян*). Считается, что возврат пакета и потеря пакета – это одно и то же событие, так как оба эти результата одинаково важны для дальнейшего функционирования системы. В этом случае, если пакет вернулся, то мы получили необходимую информацию о виртуальной машине, находящейся в сети, а если пакет потерян, мы можем сделать вывод, что виртуальная машина отказала. При любом исходе данной операции цель мониторинга выполняется.

После *ping* происходит запись данных в структуру за небольшой интервал времени (*запись данных от VM в структуру*). Переходы записи данных в структуру срабатывают по очереди, так как каждый из них может сработать, только если *мьютекс* свободен. Метка из

*мьютекса* попадает в переход, он срабатывает, затем метка снова возвращается в *мьютекс*. В следующий момент времени может работать параллельно работающий поток. После срабатывания перехода *запись данных от VM в структуру* метка попадает в *семафор*. Количество меток в семафоре должно быть равно количеству виртуальных машин в сети. Количество дуг, выходящих из семафора в переход *передача данных на сервер*, также должно быть равно количеству виртуальных машин. Переход *передача данных на сервер* срабатывает только при условии, что все потоки записали свои данные в структуру, то есть если все метки попали в *семафор*. *Передача данных на сервер* также может завершиться неудачей (*ошибка передачи данных*). Если данные передались на сервер, то происходит их обработка и сервер снова свободен. Цикл повторяется.

Рассмотрим некоторые переходы более подробно. На рис. 2 изображена временная сеть Петри, детализирующая переход *процесс подключения*.

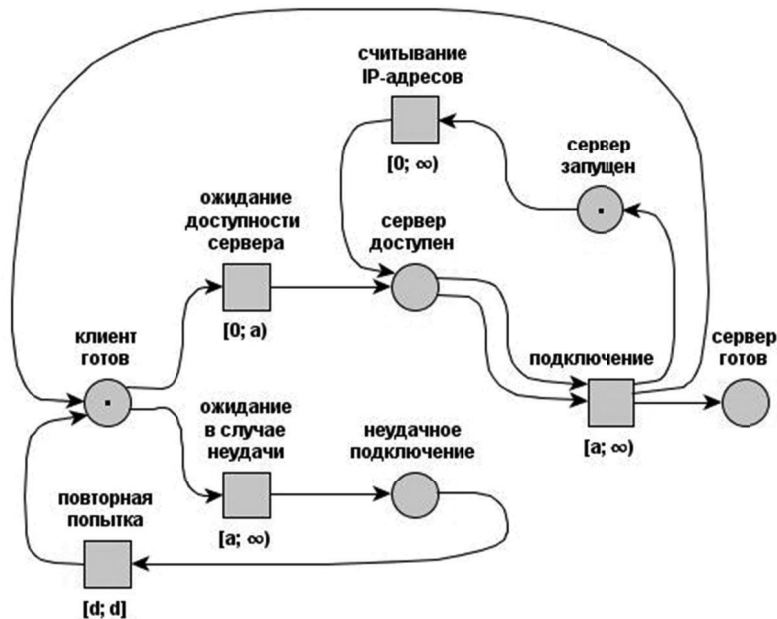


Рис. 2. Процесс подключения

Процесс подключения начинается с попытки подключения. Когда клиент готов, он пытается подключиться к серверу, проверяя тем самым доступность сервера. Некоторый интервал времени клиент ждет доступности сервера (*ожидание доступности сервера*). Если переход не успевает сработать за заданное время, это означает, что сервер не доступен в данный момент. Тогда срабатывает переход *ожидание в случае неудачи*. Затем клиент повторяет попытку подключения (*повторная попытка*). Если попытка подключения завершилась успехом и *сервер доступен*, происходит собственно *подключение*. После этого сервер готов передать данные клиенту. Доступность сервера означает то, что пользователь ввел список IP-адресов виртуальных машин (*считывание IP-адресов*). Интервал  $[d; d]$  означает, что повторная попытка происходит мгновенно.

На рис. 3 изображена временная сеть Петри, детализирующая переход *ping*.

В программе будет столько переходов *ping*, сколько виртуальных машин в сети. Каждый переход выполняется в отдельном потоке. Время работы перехода определяется интервалом  $[e; \infty)$ . Это означает, что переход может срабатывать долгое время, и он обязательно сработает. Но внутри *ping* имеются жесткие временные ограничения. Именно поэтому необходимо рассмотреть его отдельно от общей сети. *Ping* может сработать после того, как клиент получил адреса виртуальных машин от сервера. Сначала происходит посылка пакета до виртуальной машины за короткий промежуток времени (*посылка пакета*). Когда пакет послан, мы ждем его возвращения. Время ожидания задано в программе. Оно является крити-

ческим. Если пакет не успел вернуться за определенное время, он считается потерянным. Возврат пакета должен произойти за время, заданное интервалом  $[e; f]$  (*возврат пакета*). Если этот переход не сработал, срабатывает переход *ожидание возврата пакета*. Независимо от того, какой из переходов сработал, мы получаем результат (*пакет вернулся/утерян*).

Временные сети Петри являются очень удобным математическим аппаратом для моделирования подобных систем. С помощью представленной модели легко проследить работу системы мониторинга в любой момент времени, детально рассмотреть происходящие процессы. Но существуют задачи, для решения которых нужны более общие временные модели [8]. Именно поэтому в работе [5] было введено обобщение временных сетей Петри, названное временным дистрибутивным асинхронным автоматом.

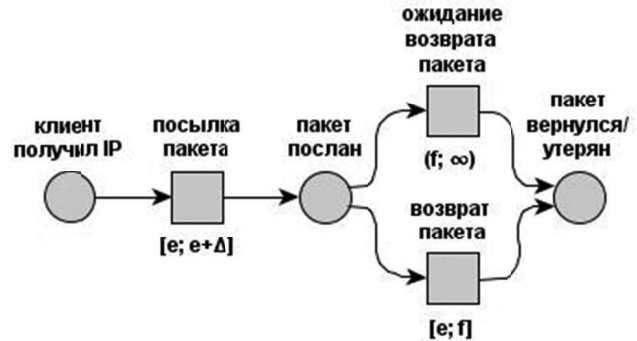


Рис. 3. Пинг

Временной дистрибутивный асинхронный автомат – это семиэлементный кортеж

$$\mathcal{A} = (S, s_0, E, I, Tran, Eft, Lft),$$

состоящий из множеств  $S$  и  $E$ , элемента  $s_0 \in S$ , отношения  $Tran \subseteq S \times E \times S$ , семейства антирефлексивных симметричных отношений  $I = (I_s)_{s \in S}$ ,  $I_s \subseteq E \times E$ , пары функций  $Eft: E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ ,  $Lft: E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \cup \{\infty\}$ , удовлетворяющих для всех  $a \in E$  неравенству  $Eft(a) \leq Lft(a)$ .

На рис. 4 показан временной дистрибутивный асинхронный автомат, который определяет сеть Петри «Процесс подключения», представленную на рис. 2.

Маркировкам сети Петри  $m_i$  соответствуют состояния автомата  $S_i, i \in \{0, 5\}$ . Перечислим эти состояния:  $S_0$  – клиент готов/ сервер запущен (начальная маркировка сети);  $S_1$  – сервер доступен/сервер запущен;  $S_2$  – сервер доступен (IP – адреса считаны);  $S_3$  – клиент готов/сервер доступен;  $S_4$  – сервер доступен/неудачное подключение;  $S_5$  – сервер запущен/неудачное подключение. Переходам сети  $t_i$  соответствуют действия  $a_i, i \in \{1, 5\}$  (на рисунке изображены стрелками с временными интервалами). Заметим, что при построении временного дистрибутивного асинхронного автомата не учитывалось место *сервер готов*, так как оно играет роль исключительно для дальнейшего моделирования и в данном контексте его можно опустить.

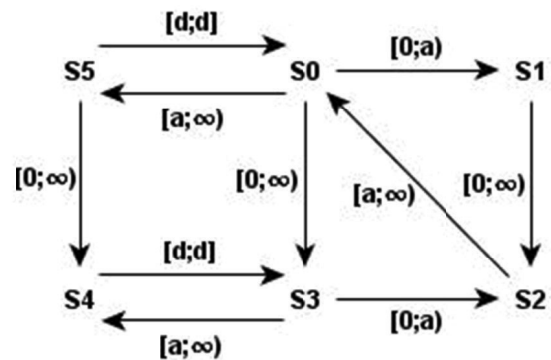


Рис. 4. Временной дистрибутивный асинхронный автомат

Построенная математическая модель позволяет легко рассчитывать время, необходимое для перехода из одного состояния в другое. Для примера рассчитаем минимальное время выполнения операций, ведущих из состояния  $S_1$  в  $S_0$ . Минимальное время выполнения операций рассчитывается по формуле  $\max(Eft(a_2), Eft(a_3))$ , где  $a_2 = [0; \infty)$ ,  $a_3 = [a; \infty)$ . Соответственно минимальное время будет равно  $a$ .

### Программное обеспечение

Система мониторинга состояния объектов представляет собой клиент-серверное приложение с веб-интерфейсом. Назначение системы мониторинга – следить за корректным функционированием виртуальных машин в пределах одной сети. Серверная часть разрабо-

тана на базе операционной системы семейства Windows. Она представляет собой программный модуль, взаимодействующий с базой данных, а также клиентом, разработанным на базе операционной системы QNX. Клиент производит собственно мониторинг группы виртуальных машин и работает в режиме реального времени, то есть в таком режиме работы автоматизированной системы обработки информации и управления, при котором учитываются ограничения на временные характеристики функционирования.

Рассмотрим подробнее модули, входящие в состав программного обеспечения.

Клиентское приложение написано в операционной системе QNX Neutrino 6.2 на языке С. Назначение клиентского приложения – получать список IP-адресов от сервера, осуществлять непосредственно контроль сетевой активности группы виртуальных машин (производить *ping*) и возвращать результаты на сервер. Данный модуль представляет собой консольное приложение, состоящее из нескольких процедур. Перечислим главные из них: процедура установки соединения с сервером, процедура конвертации IP-адреса из байтового представления в строку, процедура запуска *ping*, процедура прерывания *ping* через определенное время, процедура конвертации данных ICMP пакета в строку, процедура анализа информации и вывода на печать, процедура вычисления времени работы *ping* и другие. Серверное приложение разработано в операционной системе Windows XP на языке С# с использованием средств Visual Studio 2008. Назначение серверного приложения – получать IP-адреса из базы данных, отправлять их клиенту, получать от клиента результаты, обрабатывать их и записывать в базу данных. При первом запуске системы серверное приложение также используется для ввода IP-адресов и запуска мониторинга. В серверном приложении имеется интерфейс взаимодействия с пользователем, поэтому оно может частично заменить веб-интерфейс в случае невозможности использования последнего. К основным процедурам серверного приложения можно отнести процедуры работы с базой данных (выборка и запись данных), обработчики пунктов меню (задание IP-адресов, вызов справки), процедуры инициализации форм и диалоговых окон и другие. Веб-интерфейс написан в операционной системе Windows XP на языке PHP, JavaScript и HTML с использованием Wampserver 2.1. Благодаря существованию веб-интерфейса, программное обеспечение имеет ряд дополнительных возможностей, а именно: авторизация пользователя, добавление нового пользователя, ввод и удаление IP-адресов, отображение узлов сети, построение диаграмм и сбор статистики, создание отчетов. Все результаты работы системы мониторинга сохраняются в базе данных под управлением MySQL. В базе данных хранится информация об имеющихся в сети узлах, их последний статус (неизвестно, доступен, недоступен), время *ping* для каждого узла в определенную сессию, список пользователей с их логином и паролем. Также в базе сохраняется дата и время каждой сессии для вывода статистики за тот период, который задаст пользователь. С помощью SQL-запросов из базы данных всегда можно получить необходимые отчеты по работе системы, а также отображать на экране состояние виртуальных машин в текущий момент времени. В процессе функционирования программного обеспечения данные, введенные пользователем, а также полученные при мониторинге, передаются от одной подсистемы к другой, обеспечивая тем самым надежную работу всего программного обеспечения в целом.

Опишем принцип работы системы мониторинга сети. Работа системы начинается с запуска серверного приложения. После запуска пользователю необходимо ввести список IP-адресов, мониторинг которых будет осуществляться. Допускается ввод как одиночных адресов, так и диапазонов. После ввода IP-адресов на экране появляется карта сети. По ней легко проследить, какие виртуальные машины в данный момент активны, на какой машине произошел сбой. Далее к серверу на Windows подключается клиент на QNX. Клиент получает от сервера список IP-адресов, анализирует их и приступает к мониторингу. Мониторинг осуществляется путем посылки ICMP-пакета к каждой виртуальной машине в сети. Данные ICMP-пакета от каждой виртуальной машины сохраняются в специальной структуре. Чтобы избежать подмены одних данных другими, на этапе записи в структуру используется мьютекс. Посылка пакета к каждой виртуальной машине происходит в отдельном потоке, и



для записи данных от конкретной машины в структуру потока необходимо захватить мьютекс. Таким образом, в определенный момент времени может происходить запись только одного пакета данных. Чтобы отследить, были ли получены данные от всех машин в сети, в программе используется семафор. Счетчик семафора равен количеству машин в сети. В момент записи своих данных в структуру, каждый поток захватывает семафор. Таким образом, когда семафор будет полностью захвачен, мы получим данные от каждой виртуальной машины. Когда мониторинг завершен, происходит отправка данных структуры на сервер. На сервере данные анализируются, записываются в базу данных. При необходимости получения отчета соответствующие данные будут извлечены из базы. На экране отображается текущее состояние каждой виртуальной машины. Работа системы повторяется.

### Заключение

Таким образом, в данной работе моделируется функционирование системы мониторинга сети в нотации временных сетей Петри, а также приводится алгоритм работы программного обеспечения.

Работа выполнена в рамках программы стратегического развития государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования, грант № 2011-ПР-54.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вирбицкайте, И. Б. Семантические области временных структур событий / И. Б. Вирбицкайте, Р. С. Дубцов // Программирование. – 2008. – № 3. – С. 3-20.
2. Вирбицкайте, И. Б. Использование техники частичных порядков для верификации временных сетей Петри / И. Б. Вирбицкайте, Е. А. Покозий // Программирование. – 1999. – № 1. – С. 28-41.
3. Вирбицкайте, И. Б. Метод параметрической верификации поведения временных сетей Петри / И. Б. Вирбицкайте, Е. А. Покозий // Программирование. – 1999. – № 4. – С. 16-29.
4. Дубцов, Р. С. Теоретико-категорные исследования временных систем переходов с независимостью / Р. С. Дубцов // IX Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Кемерово, 2008. – 24 с.  
<http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2008/14295/dubtsov.pdf>
5. Кудряшова, Е. С. Обобщенные асинхронные системы / Е. С. Кудряшова, А. А. Хусаинов // Моделирование и анализ информационных систем. – 2012. – Т. 19. – № 4. – С. 78-86.
6. Покозий, Е. А. Метод верификации свойств параллелизма временных сетей Петри / Е. А. Покозий // Препринт, Институт Систем Информатики СО РАН. – Новосибирск. – 1999. – № 61. – 28 с.
7. Трещев, И. А. Методы построения систем автоматизированного распараллеливания приложений для архитектур с симметрично адресуемой памятью / И. А. Трещев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 29-32.
8. Хусаинов, А. А. Математическая модель задачи о читателях и писателях / А. А. Хусаинов // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы Международной науч.-практ. конф. – Хабаровск, 2011. – С. 327-332.
9. Gonzalez del Foyo. Using Time Petri Nets for modeling and verification of timed constrained workflow systems / Pedro M. Gonzalez del Foyo, J. R. Silva // ABCM Symposium Series in Mechatronics. – vol. 3. – 2008. – P. 471-478.
10. Henzinger, T. A. Timed transition systems / T. A. Henzinger, Z. Manna, A. Pnueli. In G. Goos, J. Hartmanis, editor // Real-Time: Theory in Practice, Lecture Notes in Computer Science 600. – Springer-Verlag. – 1991. – P. 226-251.
11. Penczek, W. Advances in Verification of Time Petri Nets and Timed Automata / W. Penczek, A. Pólfrola // Poland: Springer. – vol. 20. – 2006. – P. 7-12.
12. Wegener. Petri Nets with Time Windows: a comparison to Classical Petri Nets / Jan-Thierry Wegener, Louchka Popova-Zeugmann // Fundamenta Informaticae. – 2009. – № 93. – P. 337-352.

**Бреев С. В., Серебренникова А. Г.**  
**S. V. Breev, A. G. Serebrennikova**

**ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ: 3. ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ**

**HIGH SPEED MILLING OF HEAVY-DUTY MATERIALS: 3. THE BASIC FEATURES OF HIGH SPEED MILLING**



**Бреев Сергей Валерьевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гуманитарные и естественно-научные дисциплины» Анапского филиала Кубанского государственного университета (Россия, Анапа); 353440, г. Анапа, ул. Черноморская, 11. E-mail: [breevsv@mail.ru](mailto:breevsv@mail.ru)

**Mr. Sergey V. Breev** – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Humanities and Natural Sciences, the Anapa subsidiary of the Kuban State University (Russia, Anapa); 353440, city of Anapa, 11, Chernomorskaya Str. E-mail: [breevsv@mail.ru](mailto:breevsv@mail.ru)



**Серебренникова Анжела Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [S\\_angel@kmscom.ru](mailto:S_angel@kmscom.ru)

**Ms. Angela G. Serebrennikova** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina Av. E-mail: [s\\_angel@kmscom.ru](mailto:s_angel@kmscom.ru)

**Аннотация.** Третья статья из цикла статей, посвященных вопросу применения высокоскоростной обработки (ВСО) для фрезерования труднообрабатываемых материалов. Сформулированы выводы и определены научные и практические задачи, решение которых позволит практически реализовать стратегию ВСО для труднообрабатываемых материалов.

**Summary.** The third paper in a series on high-speed machining (HSM) touches upon application of HSM to milling heavy-duty materials. We make certain conclusions and identify scientific and practical tasks whose solution will allow practical implementation of HSM for heavy-duty materials.

**Ключевые слова:** высокоскоростная обработка (ВСО), тепловые потоки, моделирование процесса ВСО, производительность обработки, скорость деформации, трудоёмкость.

**Key words:** high-speed machining (HSM), heat flow, simulation of HSM processes, performance rate, strain rate, labour content.

УДК 621.91.01

Повышение скорости резания является одним из наиболее эффективных способов улучшения шероховатости поверхности. Известный из практики данный факт и известная зависимость силы резания от скорости (кривые Соломона, рис. 1), дающая снижение (минимум) в некотором диапазоне, развились в целое направление современной науки о резании – высокоскоростной обработки (ВСО).

Несмотря на широкое практическое применение данного метода обработки [3], до сих пор не разработано четких критериев для установления термина «ВСО», но при этом сохраняется стойкая ассоциативная связь ВСО с высоким числом оборотов шпинделя (20 000 – 50 000 мин<sup>-1</sup>) и высокой производительностью обработки.

Например, практики говорят, что для алюминиевых сплавов условия ВСО реализуются при скорости от 1500 м/мин, а для никелевых – от 20 м/мин, а производительность как объем удаляемого в единицу времени материала, может, в лучшем случае, оставаться такой же, чем и при традиционных скоростях, а чаще – меньше.

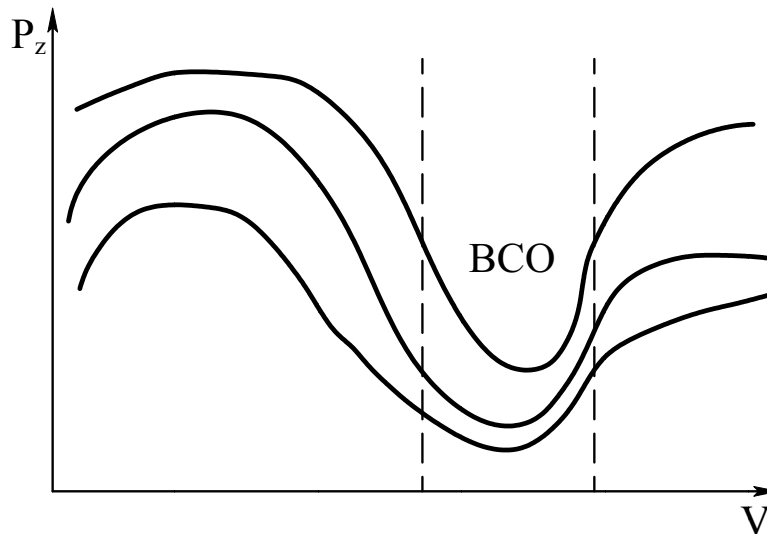


Рис. 1. Примеры кривых Соломона для различных материалов

В большинстве публикаций по этой теме освещаются вопросы, связанные непосредственно с практическим применением высокоскоростной обработки (например, [3, 4, 6, 16]), и обсуждаются вопросы по балансировке инструмента, подбору оптимальных режимов, борьбе с вибрацией, разработке оптимальных траекторий движения инструмента, характеру его износа и т. п., обобщая производственный опыт.

Одной из основных идей ВСО является создание условий, при которых оптимизируются тепловые потоки – большая часть (от 80 %) уходит в стружку и вместе с ней удаляется из зоны обработки, не успевая передать свою тепловую энергию инструменту и заготовке. Это определяет относительно небольшие значения параметров срезаемого слоя ( $B$  и  $t$  или, соответственно,  $a_p$  и  $a_e$  по терминологии зарубежных фирм) и оптимальный способ охлаждения – обдув либо «масляный туман» с высоким давлением воздуха.

Ряд работ, напротив, показывает повышение эффективности при подаче дополнительных потоков энергии для подогрева заготовки [15], используя, по-видимому, эффект краснотемперности материалов или резкое охлаждение до криогенных температур [16]. На наш взгляд, применение такого подхода в современном автоматизированном производстве требует значительного объема статистической информации – это информация о размерной точности изготавливаемых деталей и механических, эксплуатационных свойствах материала детали.

Другая часть публикаций, носящая больше научный, нежели прикладной характер, [8, 10-13, 19] сосредотачивает свое внимание на применении различных подходов к моделированию процесса высокоскоростного резания. Однако в большинстве из них применяются универсальные подходы (например, термодинамический, энергетический, синергетический и т.п.), что приводит к их универсальности и невозможности выявить особенности и критерии начала процесса ВСО в рамках используемого подхода.

Используются различные способы моделирования тепловых потоков, в частности методом конечных элементов (МКЭ) [17], и аналитическое моделирование [5]. В работе [17] приведено сравнение результатов моделирования МКЭ при обработке резанием на различных скоростях (50 и 400 м/мин) различных материалов и выявлено существенное уменьшение зоны термического влияния при ВСО, однако, необходимо отметить следующие недостатки методики проведения исследования:

– указано, что для расчета тепловых потоков использовалась модель, разработанная А.Н. Резниковым, однако, не ясно, каким образом были получены некоторые исходные данные для расчета: сила резания, размеры площадок контакта, учет изменения свойств материала в зоне обработки за счет скоростной пластической деформации и нагрева, зависимость силы резания от скорости резания и т.п.;

– выбранные для сравнения скорости резания не корректны для некоторых выбранных материалов: если для титанового сплава ВТ-9 скорость резания 50 м/мин можно назвать традиционной, а 400 м/мин – высокой, то для алюминиевого сплава Д-16Т обе скорости являются низкими, а для стали 30ХГСА, обрабатываемой традиционно на скоростях 100-150 м/мин, скорость 50 м/мин слишком мала для сравнения;

– несмотря на то, что в названии статьи значится «фрезерование труднообрабатываемых материалов», рассмотренная модель не учитывает основные его особенности: переменность толщины срезаемого слоя, пластическое деформирование поверхности заготовки, предшествующее стружкообразованию, последующий зуб фрезы, имеющий температуру окружающей среды, входит в контакт с заготовкой, имеющей температуру выше за счет резания предыдущим зубом, и в соответствии со вторым началом термодинамики, будет интенсивно охлаждать заготовку, и т.п.

Указанные недостатки методики проведения исследования являются существенными, поэтому его результаты могут оказаться не адекватными реальному процессу и на них нельзя опираться. В ряде работ (например, [5, 7]) показано, как существенно может вырасти производительность и/или качество обработки при учете тепловых явлений за счет управления режимами обработки.

Это говорит о необходимости построения модели формирования и распределения тепловых потоков при ВСО на основе уточненной механической модели обработки, при этом методика исследования обязательно должна учитывать вышеперечисленные особенности фрезерования.

На наш взгляд, в качестве теоретического обоснования существования минимального значения силы резания при определенных скоростях резания может быть принято явление скоростного упрочнения, т.е. наличие прогрессивной зависимости напряжения текучести  $\sigma_s$  от скорости деформации  $\sigma_s = f(\dot{\epsilon})$ . На данное явление существует две основные точки зрения:

1. Различие значений механических характеристик, полученных при скоростях деформации, отличающихся в сотни раз, не превышает разброса значений, полученных при испытаниях различных образцов на одной скорости деформирования, т.е. является статистически не значимой [9].

2. Такая зависимость существует, однако, она не настолько значительна, чтобы ее учитывать при моделировании процессов обработки материалов [1, 2, 18], т.к., во-первых, нет точных экспериментальных данных для реально используемых скоростей, а, во-вторых, ее учет значительно усложняет расчеты.

Как представляется авторам, исследование и учет такой зависимости наряду с решением задачи по управлению распределением тепловых потоков позволит раскрыть основные механизмы ВСО, а формулировка конкретных требований к режущему инструменту и станку на их основе – значительно повысить эффективность высокоскоростного фрезерования.

Проводятся разработки в области оптимизации геометрии режущего инструмента [20], прежде всего конической формы самой фрезы, однако в открытой печати не приводятся конкретных сведений о геометрических параметрах и режимах обработки, сочетание которых позволяет значительно улучшить технологические показатели обработки: стойкость инструмента, производительность обработки, параметры качества поверхности и т.п.

До сих пор открытым является вопрос о качестве поверхности, обработанной высокоскоростным фрезерованием. Данных по шероховатости обработанной поверхности существует достаточно много [3, 4, 16], однако остались вопросы формирования и распределения



наклепа и остаточных напряжений, происходящих при этом процессе, а, следовательно, и эксплуатационных характеристик поверхности (в том числе, и коррозионная стойкость).

Анализ публикаций [14] показывает также наличие трудностей в проектировании станков, позволяющих реализовать ВСО. Связано это и с неконкретностью понятия «компоновка» станка, а также с требованиями, которые предъявляет ВСО: значительные ускорения узлов станка, малая инерционность при перемене направления движения, система ЧПУ, способная «заглядывать вперед» на 1000 кадров и более, внутренний подвод СОТС и др.

Таким образом, в области фрезерования труднообрабатываемых материалов определяется следующая цель: повышение эффективности фрезерования труднообрабатываемых материалов путем увеличения производительности обработки, стойкости инструмента, сокращения трудоемкости и себестоимости деталей за счет исследования и оптимизации условий ВСО.

### **ВЫВОДЫ:**

1. Высокоскоростное фрезерование имеет ряд особенностей, особенно остро проявляющихся при обработке труднообрабатываемых материалов: переменность толщины срезаемого слоя, цикличность рабочего и холостых ходов, переменность длины контакта по зубу.

2. Несмотря на наличие множества разработок в области ВСО, на практике такой вид обработки применяется только для легких сплавов и высокотвердых сталей, причем главные положительные эффекты ВСО сталей заключаются не в повышении производительности, а в упрощении технологического процесса за счет исключения самоотпуска обрабатываемой поверхности. Практического применения стратегии высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов, отличающихся высокой вязкостью, нет.

3. Множество критериев обрабатываемости материала могут давать противоречивую информацию, поэтому необходима разработка единого комплексного критерия обрабатываемости материала, дающего всю практически необходимую информацию: стойкость инструмента, производительность обработки, экономичность и т.п.

4. В настоящее время перед учеными определяются следующие научные направления разработки стратегии ВСО труднообрабатываемых материалов:

- разработка модели поведения высокоскоростной деформации и разрушения труднообрабатываемых материалов;
- исследование и разработка критерия ВСО, а также диапазона ВСО для труднообрабатываемых материалов;
- исследование и объяснение причин существования диапазона скоростей, при которых сила резания минимальна;
- исследование формирования и распределения тепловых потоков в зоне обработки при ВСО;
- разработка методики определения диапазона скоростей минимума силы резания для конкретного материала и его увязка с критерием обрабатываемости;
- разработка методики оценки наклепа и внутренних напряжений, возникающих при ВСО.

5. Основные практические направления для производственной реализации ВСО труднообрабатываемых материалов:

- оптимизация составов и структур инструментальных материалов и покрытий, геометрии режущих инструментов, способных воспринимать значительную термомеханическую нагрузку;
- разработка узлов станка с максимально возможной жесткостью и виброустойчивостью и систем ЧПУ, позволяющих реализовать основные принципы ВСО, в том числе оптимальные траектории движения инструмента;
- оптимизация состава, способа и режима подачи СОТС;
- определение режимов обработки, обеспечивающих требуемый уровень эксплуатационных характеристик поверхности.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Воронцов, А. Л. Разработка новой теории резания: 5. Определение кинематического, напряженного и деформированного состояния заготовки / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 61-69.
2. Воронцов, А. Л. Разработка новой теории резания: 6. Определение основных параметров процесса резания / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 64-70.
3. Высокоскоростное резание. <http://www.delcam-ural.ru/cam/tehpodderjka> [электронный ресурс]
4. Григорьев, С. Н. Обеспечение заданного качества деталей при высокоскоростной обработке / С. Н. Григорьев, В. И. Завгородний, А. Р. Маслов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 1. – С. 38-40.
5. Зантур Сахби. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений // Зантур Сахби, В. А. Богуславский, Т. Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – № 39. – С. 77-84.
6. Макаров, В. Ф. Интенсификация лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов на основе физической оптимизации процессов резания / В. Ф. Макаров, В. В. Семиколенных, Н. Е. Чигодаев, Г. В. Веснин // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17-18. – С. 129-135.
7. Макаров, В. Ф. Управление величиной оптимальной скорости резания при протягивании деталей ГТД на станке с ЧПУ // В. Ф. Макаров, В. Р. Туктамышев // Вестник УГАТУ. – 2009. – № 4. – С. 36-40.
8. Некрасов, Ю. И. Оценка разрушений инструмента при точении жаропрочных сталей и сплавов на станках с ЧПУ / Ю. И. Некрасов // Омский научный вестник. – 2010. – № 3. – С. 57-63.
9. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 504 с.
10. Постнов, В. В. Интенсификация нестационарного резания труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации термодинамических условий изнашивания режущего инструмента / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2006. – Т. 7. – № 2. – С. 92-98.
11. Постнов, В. В. Оптимизация термодинамических условий нестационарного резания труднообрабатываемых материалов / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2007. – № 1. – С. 100-107.
12. Постнов, В. В. Термодинамический критерий оценки режущей способности инструментальных материалов / В. В. Постнов, С. Х. Хадиуллин // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9. – № 6. – С. 162-169.
13. Резание труднообрабатываемых материалов / под ред. П. Г. Петрухи. – М.: Машиностроение, 1972. – 175 с.
14. Реченко, Д. С. Компоновка высокоскоростного оборудования / Д. С. Реченко, А. Ю. Попов // Омский научный вестник. – 2010. – № 3. – С. 113-115.
15. Седов, Д. И. Повышение эффективности обработки титановых сплавов за счет предварительного охлаждения / Д. И. Седов, Т. Г. Насад // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – Вып. 1. – С. 89-96.
16. Селиванов, А. Н. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения / А. Н. Селиванов, Т. Г. Насад // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 3 (46). – С. 55-61.
17. Трусов, В. Н. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов / В. Н. Трусов, Д. Л. Скуратов, О. И. Законов, В. В. Шикин // Вестник СГАУ. – 2011. – Ч. 1. – №3 (27).
18. Унсков, Е. П. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унсков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]; под ред. Е. П. Унскова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983 – 598 с.
19. Ярославцев, В. М. Методология совершенствования технологий промышленного производства и разработки новых методов обработки / В. М. Ярославцев // Наука и образование. – 2012. – № 3. – С. 1-13.
20. Никулин, Д. С. Разработка концевых фрез для высокопроизводительной обработки авиационных деталей в условиях Иркутского авиационного завода // Высокоэффективные технологии производства летательных аппаратов: сб. докладов / Д. С. Никулин; под общ. ред. А. Ю. Дьяка. – Иркутск: ИрГТУ, 2012. – С. 39-46.

**Муравьев В. И., Пицык В. С.**  
**V. I. Muravyev, V. S. Pitcyk**

### **ВЛИЯНИЕ ПРЕССОВОЙ ПОСАДКИ НА ПРОЦЕССЫ «СХВАТЫВАНИЯ» В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК**

### **INFLUENCE OF FORCED FITTING ON THE PROCESSES OF "SEIZURE" IN THE CONNECTION ZONE OF TUBULAR BILLETS**



**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8-962-298-52-21. E-mail: VMuravyev@mail.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor of Engineering, Professor, Chief Research Fellow, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Russia, Komsomolsk-on-Amur; + 7 962 2985221. E-mail: VMuravyev@mail.ru.



**Пицык Виктор Сергеевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8-914-194-64-10. E-mail: BiktopSergeevich@yandex.ru.

**Mr. Viktor S. Pitcyk** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Russia, Komsomolsk-on-Amur; + 7 914 1946410. E-mail: BiktopSergeevich@yandex.ru.

**Аннотация.** Рассмотрен механизм образования физического контакта и «схватывания» между поверхностями заготовок при прессовой посадке. Определен характер влияния режимов прессовой посадки и чистоты обработки поверхности заготовок на прочность прессового соединения. Рассмотрена возможность применения предварительной термической обработки как средства управления их геометрическими размерами. Определены основные направления повышения эффективности процесса прессовой посадки при получении неразъемных соединений.

**Summary.** The paper considers the mechanism of forming a physical contact between the surfaces of billets and of "seizure" during forced fitting. We determine the nature of how forced fitting modes and purity of the surface finish of billets impact on the strength of compression joints. A possibility is considered of using preliminary heat treatment of billets as a means of controlling their geometric dimensions. Defined are the main ways of enhancing the efficiency of the process of forced fitting when making permanent connections.

**Ключевые слова:** тугая посадка, схватывание, диффузионное взаимодействие, трубопровод, прочность, шероховатость, коэффициент линейного теплового расширения, прочность.

**Key words:** force fit, seizure, diffusion interaction, pipeline, strength, roughness, linear thermal expansion coefficient

УДК 621.791.14;18

#### **Введение**

Сварка относится к тем технологиям, которые применяются почти во всех отраслях промышленности, и особенно широко при изготовлении деталей, узлов и сборочных единиц в производстве продукции машиностроения, авиации, космонавтики, энергетики, ядерной

техники, приборов различного назначения и т.д. Наиболее распространенными способами сварки в настоящее время являются различные методы сварки плавлением [3, 4]. Однако данные методы имеют ряд существенных недостатков: недостаточная надежность соединения в условиях интенсивного нагружения и наличия агрессивных сред; высокая трудоемкость и энергоемкость производства соединений; невозможность, в большинстве случаев, обеспечения равенства механических свойств металла соединения свойствам основного металла; высокая вероятность образования концентраторов напряжений и внутренних дефектов (поры, включения, микротрещины) в металле соединения, что актуализирует вопросы разработки и усовершенствования методов получения неразъемных соединений, позволяющих исключить вышеобозначенные недостатки, в частности методов сварки в твердой фазе. Однако уровень развития данной области науки и техники в настоящее время не располагает достаточными данными для создания методов и технологий получения соединений в твердой фазе, особенно при сварке элементов трубопроводных систем, способных конкурировать с методами сварки плавлением. Перспективным направлением развития данного направления науки и техники является применение методов тугой посадки деталей типа отверстие – вал как способа получения неразъемного соединения [5].

При всех способах сварки в твердой фазе механизм образования соединения происходит в три стадии: 1) формирование физического контакта, 2) активация контактирующих поверхностей, 3) объемное взаимодействие. При этом процесс формирования физического контакта является основополагающим, так как на данном этапе происходит сближение атомов соединяемых материалов на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие (обусловленное дисперсионными силами типа Ван-дер-Ваальса), или расстояние, при котором возможно слабое химическое взаимодействие. Интенсивное развитие второй и третьей стадий, а следовательно, и образование надежного сварного соединения невозможно без образования физического контакта [1, 205].

Данная работа посвящена исследованию образования физического контакта при прессовой посадке деталей типа отверстие – вал.

#### **Методика проведения исследования**

В качестве образцов использовались трубные заготовки из титанового (ПТ7М), алюминиевого (АМг5) сплавов и стали марки 12Х18Н10Т (см. рис. 1). Анализ химического состава образцов проводился спектральным анализом на оптическом эмиссионном анализаторе марки Q4Matrix Analysis Results фирмы BRUKER.

Запрессовка заготовок производилась по схеме, представленной на рис. 2, а, на машине Instron 3382K7046 с фиксацией усилия запрессовки и применением приспособлений, показанных на рис. 2, б – е. Для создания необходимого натяга в соединении образцы обрабатывались на токарном станке 1Д95, обработка осуществлялась в соответствии с размерами, указанными на рис. 1.

После запрессовки полученные образцы подвергались растяжению на машине Instron 3382K7046 до разрушения соединения с фиксацией растягивающего усилия, также заготовки были подвергнуты механическим испытаниям в сложнонагруженном состоянии на сплющивание по ГОСТ 8695-75.

Анализ микроструктуры зоны соединения образцов проводился при помощи электронного микроскопа MICRO-200 и растрового микроскопа Hitachi S3400N, образцы для анализа микроструктуры были подготовлены при помощи настольного абразивного отрезного станка Delta AbrasiMet и шлифовально-полировального станка EcoMet 250 с полуавтоматической насадкой AutoMet 250.

Также был произведен расчет изменения геометрических параметров заготовок на основании сведений об изменении линейного коэффициента теплового расширения в зависимости от температуры материала. На основании расчетов были построены частные кривые для изменения наружных и внутренних диаметров заготовок.

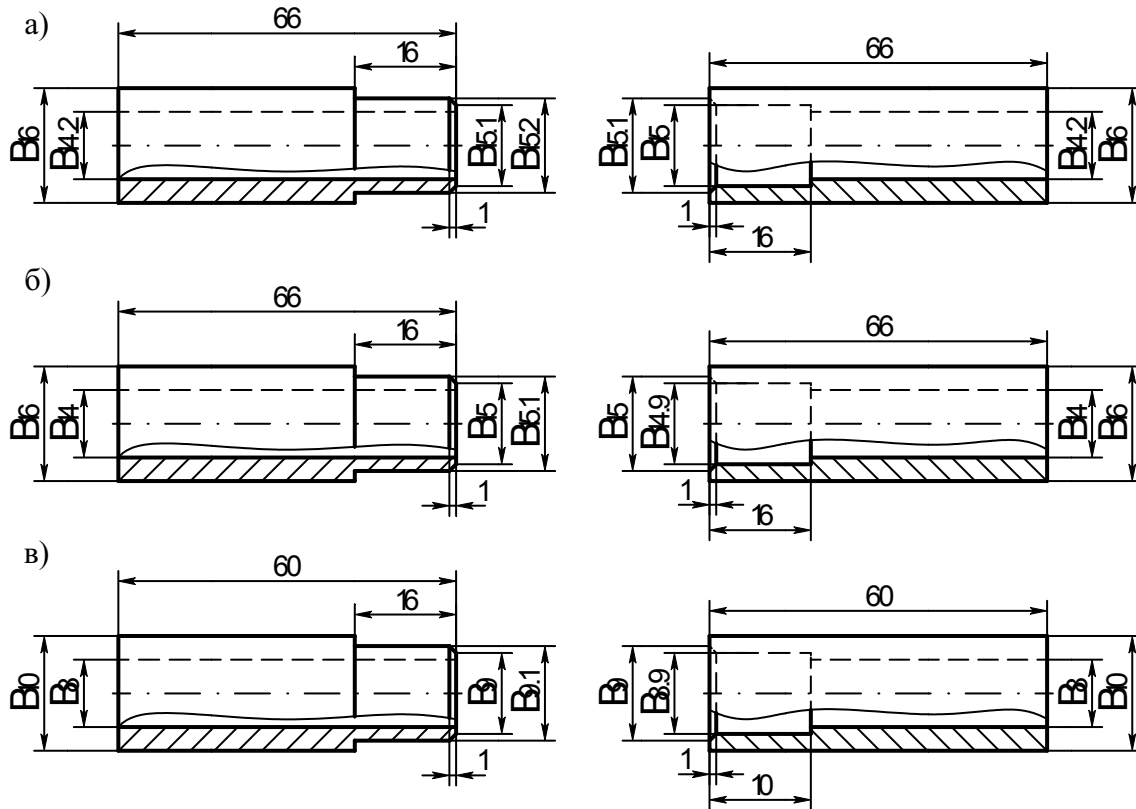


Рис. 1. Эскизы заготовок для тугой посадки с натягом 100 микрон:  
 а – титановые образцы; б – алюминиевые образцы;  
 в – образцы из нержавеющей стали

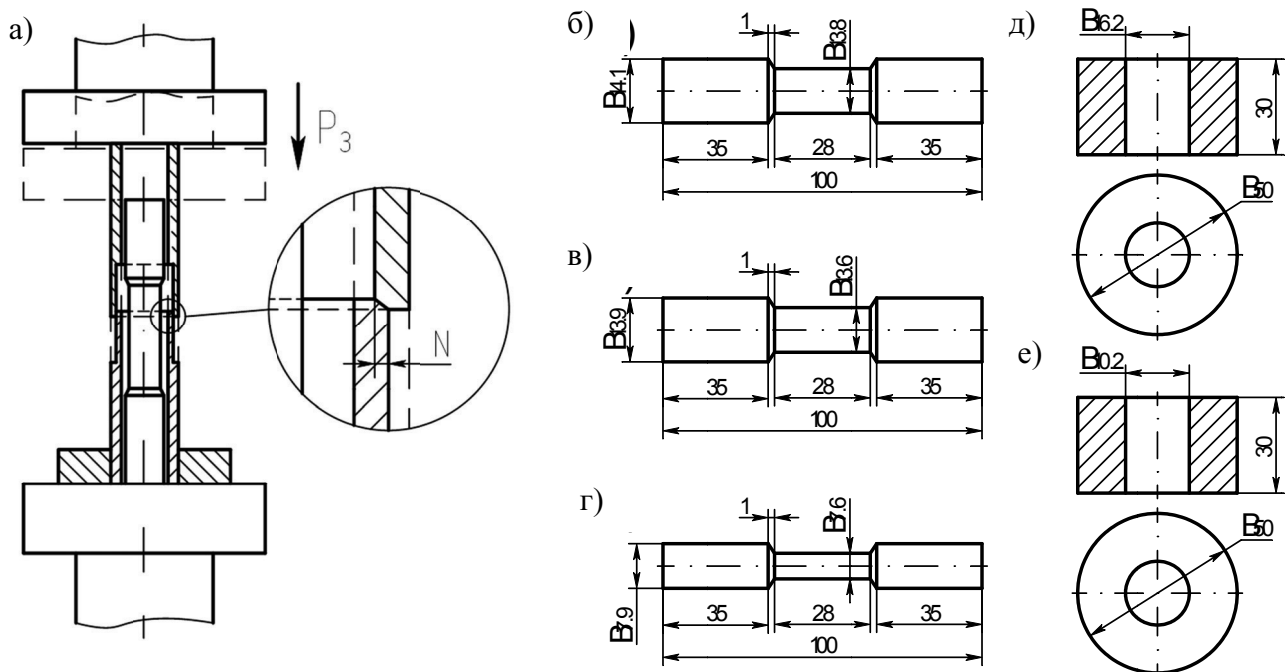


Рис. 2. Схема получения прессового соединения: а – схема запрессовки образцов; б – центрирующий штифт для титановых образцов; в – центрирующий штифт для алюминиевых образцов; г – центрирующий штифт для стальных образцов; д – опора для титановых и алюминиевых образцов; е – опора для стальных образцов;  
 $P_3$  – усилие запрессовки;  $N$  – величина натяга в соединении

**Результаты экспериментов и их обслуживание**

По результатам спектрального анализа образцов на оптическом эмиссионном анализаторе (см. табл. 1) было определено, что химический состав используемых образцов соответствует требованиям нормативной документации.

Таблица 1

## Химический состав образцов

| 12X18H10T |       |       |       |       |        |         |       |       |       |        |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|--------|-------|
| C         | Cr    | Fe    | Mn    | Ni    | P      | S       | Si    | Ti    |       |        |       |
| 0.111     | 18.09 | 69.23 | 1.272 | 9.552 | 0.0317 | 0.0015  | 0.531 | 0.567 |       |        |       |
| AMr5      |       |       |       |       |        |         |       |       |       |        |       |
| Fe        | Si    | Mn    | Ti    | Al    | Cu     | Be      | Mg    | Zn    | Cr    | Ni     |       |
| 0,255     | 0,245 | 0,649 | 0,017 | 92,94 | 0,026  | 0,00089 | 5,653 | 0,35  | 0,033 | 0,0023 |       |
| ПТ7М      |       |       |       |       |        |         |       |       |       |        |       |
| Fe        | C     | Si    | Ti    | Al    | Zr     | Mn      | Cr    | Ni    | Mo    | V      | W     |
| 0,053     | 0,017 | 0,012 | 94,67 | 2,364 | 2,490  | 0,01    | 0,021 | 0,013 | 0,066 | 0,0088 | 0,166 |

Из зависимостей, приведенных на рис. 3, отчетливо видно, что увеличение значения натяга и площади контакта в соединении приводит к увеличению усилия запрессовки. Это связано с тем, что при прессовой посадке происходит частичное смятие и сглаживание микровыступов поверхностей контакта, и при увеличении натяга в соединении число микровыступов, участвующих в контакте, возрастает. Также видно, что на большем участке кривые имеют практически линейную зависимость, исключение составляют зоны начала и завершения запрессовки.

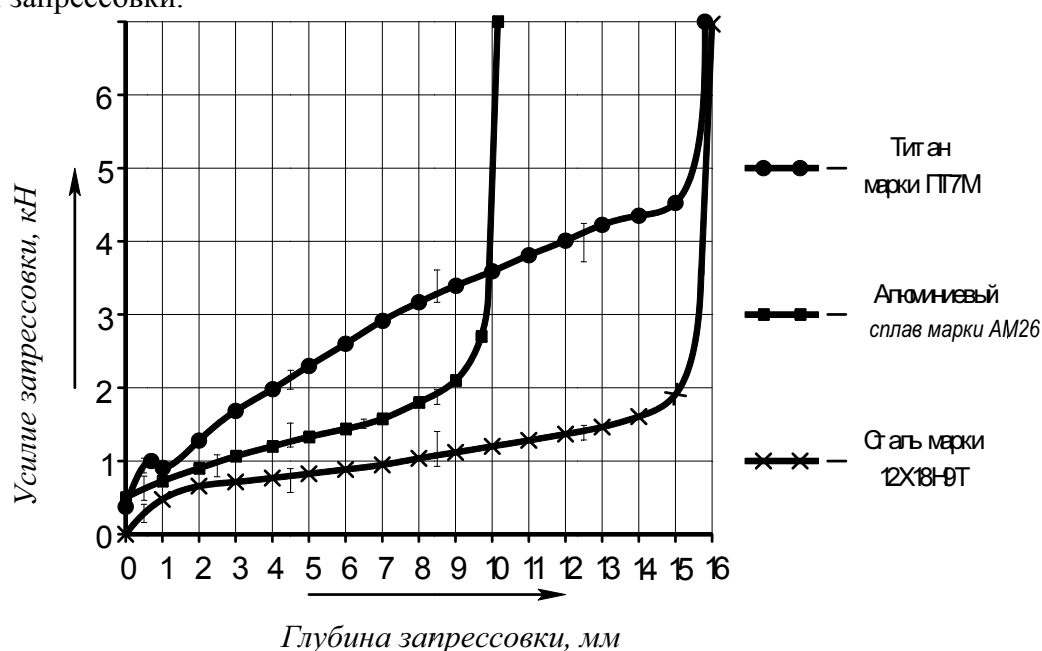


Рис. 3. Зависимость величины усилия запрессовки от глубины запрессовки и площади контакта

Характер влияния величины натяга на прочность прессового соединения представлен на рис. 4, б. Видно, что с увеличением натяга прочность соединения также растет. Так, при натяге в 80 мкм прочность соединения составила 7,33 МПа, а при натяге в 100 мкм – 18,88 МПа, т.е. при увеличении натяга на 20 мкм произошло увеличение прочности соединения более чем в 2 раза. Но по сравнению с цельной заготовкой (см. рис. 4, а) прочность прес-

сового соединения очень мала (прочность прессового соединения с величиной натяга в 100 мкм более чем в 30 раз ниже прочности цельной заготовки). Однако в работе [3, 43] показано, что значительное увеличение натяга (до 300 мкм) позволяет получить соединение, прочность которого соизмерима с прочностью цельноштампованной заготовки и всего вдвое ниже прочности основного металла.

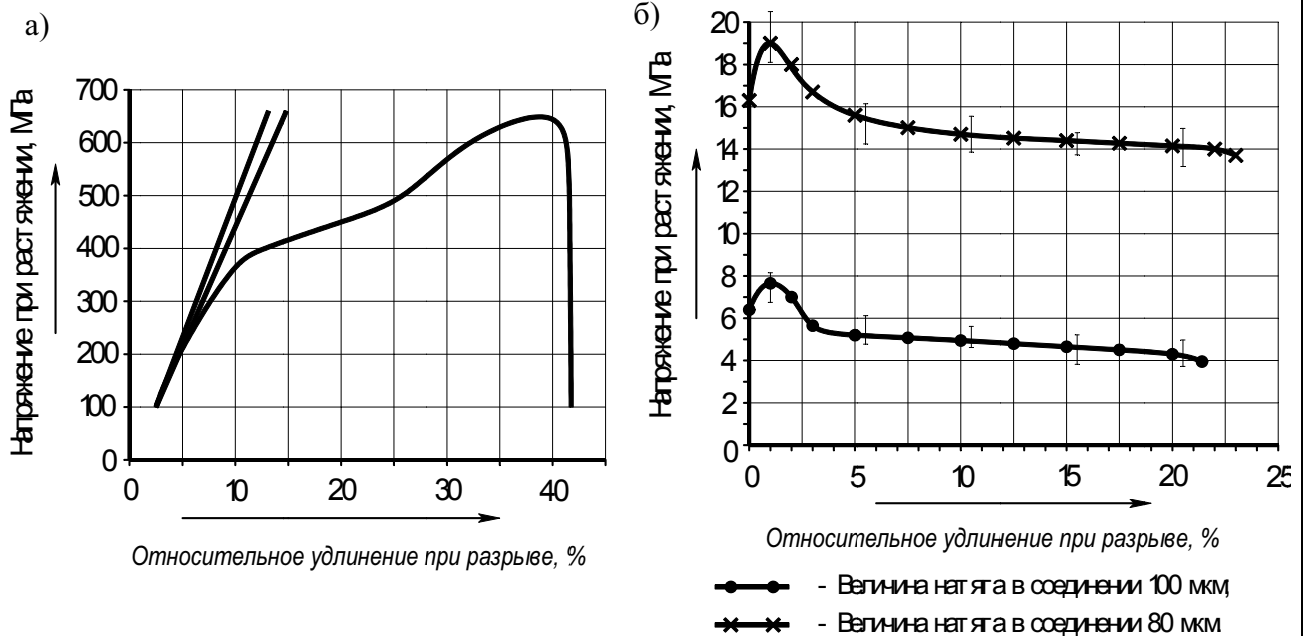


Рис. 4. Влияние величины натяга на прочность соединения при испытаниях на разрыв образцов из стали 12X18H10T:  
 а – цельный образец; б – прессовое соединение

Результаты, полученные при испытаниях на сплющивание (см. рис. 5), подтверждают результаты экспериментов по растяжению образцов: при увеличении величины натяга наблюдается повышение прочности заготовок; цельная заготовка обладает наиболее высокими показателями прочности. Однако при данных испытаниях прочность прессовых соединений соизмерима с прочностью цельной заготовки.

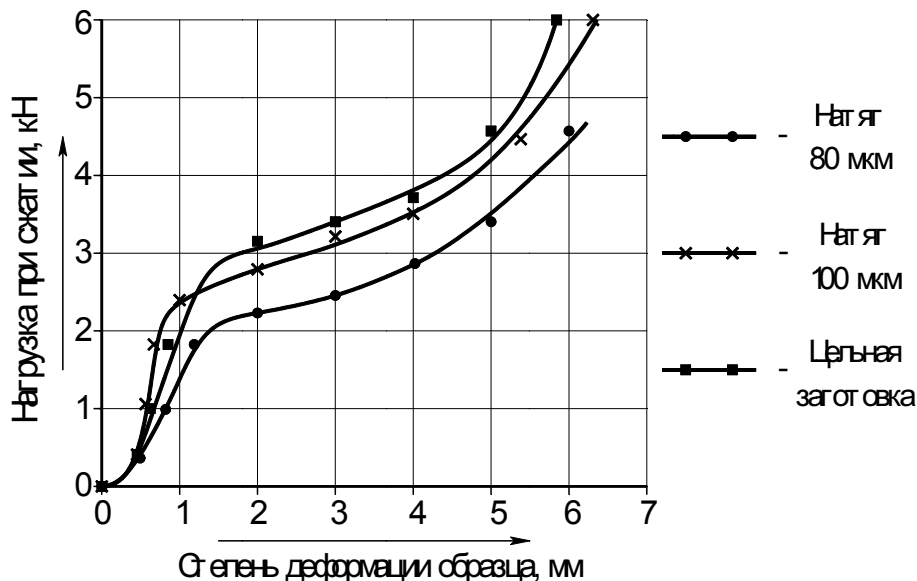


Рис. 5. Испытания на сплющивание

Прочность прессового соединения при величине натяга в 80 мкм у стальных образцов, при уровне деформации образцов 50 % (5 мм) ниже прочности цельной заготовки при том же уровне деформации на 25,5 %. Подобный результат объясняется тем, что основным фактором, определяющим прочность заготовок при сплющивании, является толщина стенки. При прессовой посадке суммарная толщина стенки изменяется незначительно (при посадках с натягом увеличивается).

Анализ микро- и макроструктуры прессовых соединений (см. рис. 6) при величине натяга в 100 мкм подтверждает, что на шлифах есть участки, где граница раздела между заготовками полностью исчезла или практически не различима даже при значительном увеличении, но эти зоны имеют точечный характер или очень малую протяженность, тогда как практически на всей протяженности соединения граница раздела между заготовками хорошо видна и при незначительном увеличении. Приведенные результаты говорят о том, что при традиционных методах прессовой посадки получить значительную площадь физического контакта поверхностей заготовок достаточно сложно, а поскольку механизм образования соединения в твердой фазе предполагает практически одновременное протекание этапов образования физического контакта и формирования очагов схватывания между поверхностями заготовок, то оно происходит на сугубо локальных участках, суммарная площадь которых по отношению к общей площади контакта, не превысит 1 – 3 %. Подобная картина наблюдается на всех подготовленных шлифах независимо от материала заготовок. Низкий уровень образования физического контакта может быть вызван рядом отклонений, которые могли быть допущены как в процессе подготовки образцов к прессованию, так и в ходе самого процесса запрессовки. Определяющими в этом случае являются: отклонение размеров заготовок от заданных; отклонение от соосности при прессовании; недостаточный уровень натяга в соединении для обеспечения контакта по всей поверхности соприкосновения заготовок; возникновение пластических деформаций в зоне соединения. Отдельного внимания заслуживает влияние чистоты обработки поверхности на процесс образования физического контакта.

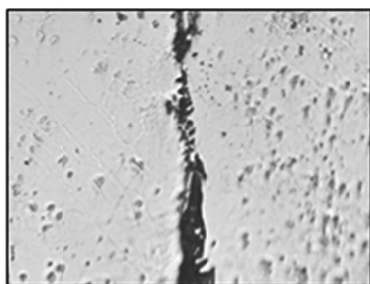
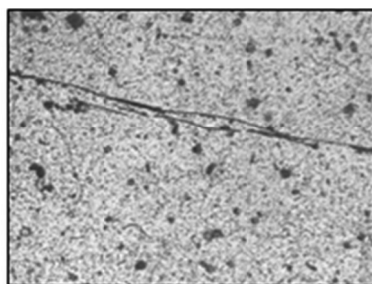
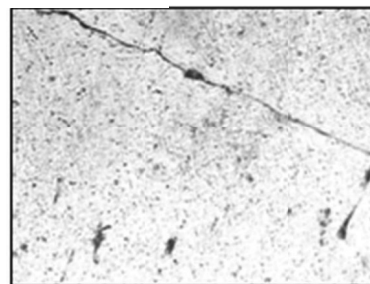
а)  $\times 400$ б)  $\times 400$ в)  $\times 400$ 

Рис. 6. Микро- и макроструктура образцов: а – образцы из сплава ПТ7М; б – образцы из сплава АМг6; в – образцы из стали марки 12Х18Н9Т

Поскольку независимо от способа сварки давлением скорость микропластической деформации ( $\dot{\epsilon}_k$ ) всегда выше скорости пластической деформации ( $\dot{\epsilon}$ ), фиксируемой или задаваемой в процессе сварки. По мере образования физического контакта  $\dot{\epsilon}_k$  уменьшается и способна достигнуть  $\dot{\epsilon}$ , когда образуется полный физический контакт. Это обусловлено тем, что напряжение в контакте ( $P_k$ ) всегда выше приложенного или фиксируемого в конкретный момент времени напряжения ( $P$ ), причем  $P_k = P/F$  (см. рис. 7). Сама микропластическая деформация ( $\epsilon_k$ ) также всегда намного больше фиксируемой пластической деформации свариваемых заготовок ( $\epsilon$ ). Высокое значение  $\dot{\epsilon}_k$  и  $\dot{\epsilon}$  обуславливают значительное упрочнение приконтактного объема металла, имеющего физический предел текучести ( $\sigma_T^Y$ ) больше физического предела текучести свариваемого металла ( $\sigma_T$ ). Упрочнение приконтактного объема может достичь такого значения, что физический контакт прекратится. При грубой обработке

поверхности, когда высота микровыступов на контактной поверхности большая, указанный эффект деформационного упрочнения приконтактного объема будет проявляться в большей степени по двум причинам.

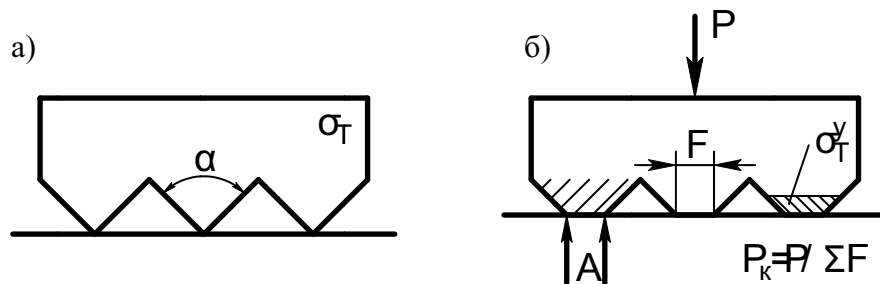


Рис 7. Схема образования физического контакта: а – до сварки; б – при сварке

Повышение шероховатости поверхности означает уменьшение угла при вершине микровыступов ( $\alpha$ ). После приложения сжимающего напряжения на образцы с такой поверхностью контактные напряжения  $P_k = P/F$  обеспечивают более высокую  $\dot{\epsilon}_k$  по сравнению с тем случаем, когда поверхность имеет микровыступы с большим углом ( $\alpha$ ). Поэтому деформационное упрочнение микровыступов при грубой обработке поверхности будет более значительное.

При грубой обработке поверхности, когда микровыступы характеризуются малыми углами  $\alpha$  при вершинах, ввиду высокой локализации пластического течения по вершинам микровыступов происходит интенсивное деформационное упрочнение в этих областях. При этом резко снижается скорость деформации микровыступов, и физический контакт образуется с малой интенсивностью. По мере снижения шероховатости контактных поверхностей и соответственно увеличения значения углов  $\alpha$  при вершинах микровыступов в пластическое течение микровыступов вовлекаются приконтактные объемы материала, что снижает степень локализации деформации. При этом снижается значение деформационного упрочнения металла в зоне контакта, обеспечивая менее существенное повышение  $\sigma_T^y$  по сравнению с  $\sigma_T$  свариваемого металла. В этих условиях физический контакт образуется с большей интенсивностью, чем при грубой обработке контактных поверхностей [2, 27-29].

Для создания неразъемного соединения в твердой фазе посредством прессового соединения необходимо значительно увеличить величину натяга в соединении. Однако практический опыт показывает, что в процессе прессования при значительных уровнях натяга в зоне соединения возникают напряжения, приводящие к пластическим деформациям заготовок (раздача охватывающей заготовки или коробление). Кроме того, получение таких соединений затруднено и по причине необходимости создания достаточно больших усилий за прессовки.

В таких условиях для увеличения значения натяга необходимо использовать термическое воздействие как способ управления геометрическими линейными размерами тела. Известно, что атомы, равно как и молекулы, во всем диапазоне температур находятся в непрерывном хаотическом движении, причем, чем выше температура объема вещества, тем выше скорость перемещения отдельных атомов и молекул внутри этого объема или их колебания в кристаллических решетках твердых тел. С ростом температуры увеличивается среднее расстояние между атомами и молекулами, в результате чего газы, жидкости и твердые тела расширяются при условии, что внешнее давление остается постоянным. Коэффициент линейного теплового расширения (табличная величина) показывает относительное изменение длины тела при повышении его температуры на  $\Delta T$ . На основании табличных данных были построены кривые изменения величины коэффициента линейного теплового расширения в зависимости от температуры тела для различных материалов (см. рис. 8).

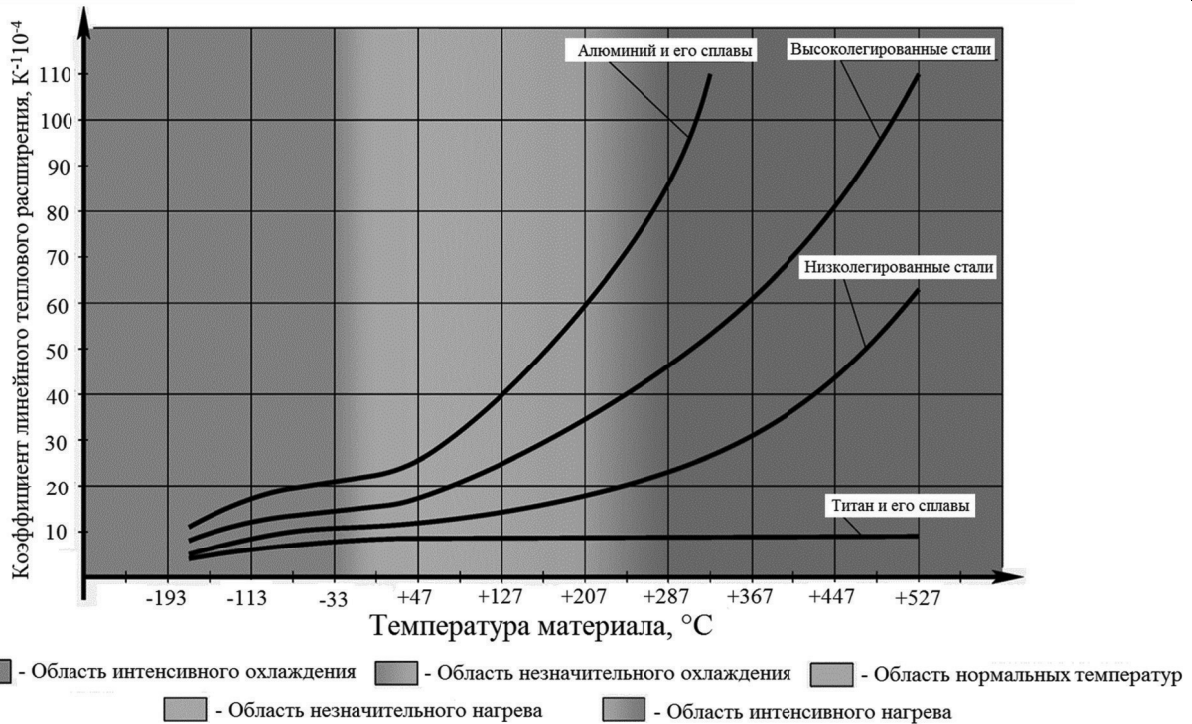


Рис. 8. Характер изменения коэффициента линейного теплового расширения в зависимости от температуры

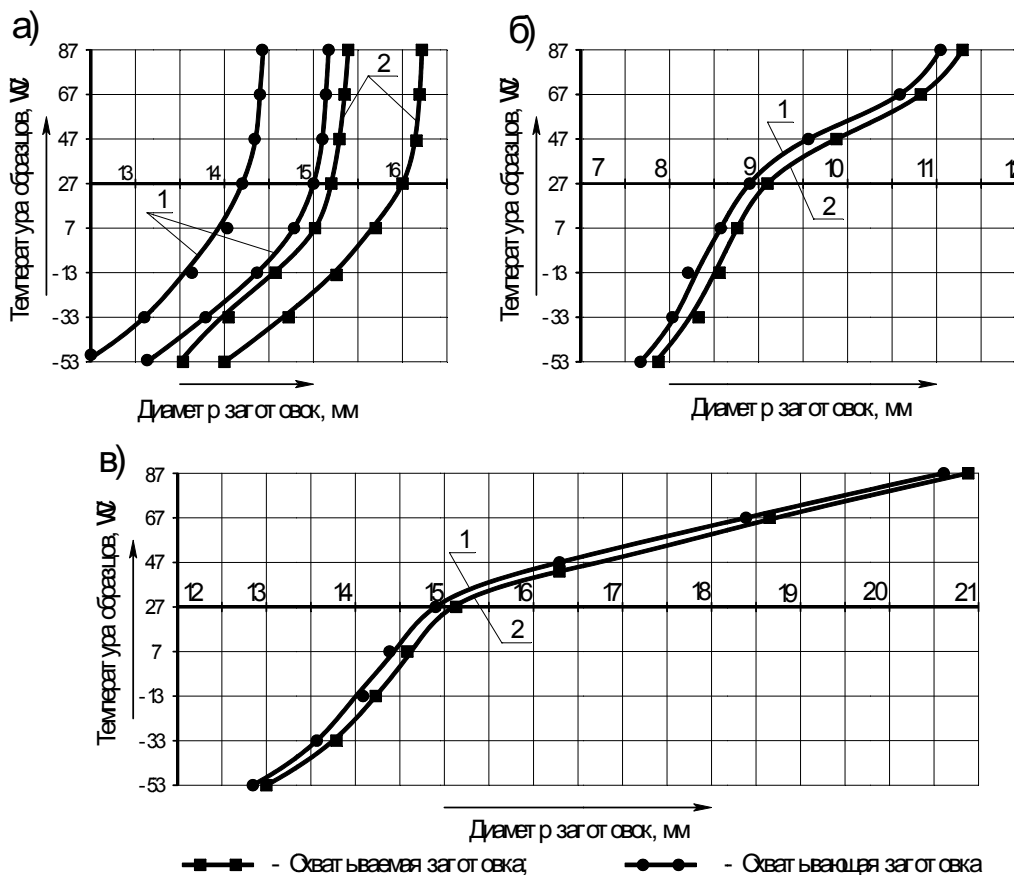


Рис. 9. Характер изменения размеров заготовок в зависимости от температуры заготовки: а – образцы из сплава ПТ7М; б – образцы из стали 12Х18Н9Т; в – заготовки из АМгб

На основании построенных графиков, а также с учетом геометрических параметров заготовок, используемых в экспериментах, были построены кривые изменения внутреннего и наружного диаметров, отвечающих за образование натяга в соединении (см. рис. 9). Из кривых видно, что, изменяя температуру заготовок в пределах от  $-50$  до  $+80$  °С, можно изменить их геометрические параметры таким образом, что позволит исключить предварительную механическую обработку заготовок и получить натяг в соединении, величина которого соизмерима с толщиной стенки заготовок.

Была осуществлена попытка получить прессовое соединение на образцах из титанового сплава без предварительной токарной обработки зоны соединения, а лишь за счет термического воздействия на заготовки. Так, охватываемая заготовка была охлаждена до температуры в  $-50$  °С в жидком азоте, охватывающая заготовка была нагрета до температуры  $+80$  °С. Однако данное термическое воздействие не дало ожидаемого изменения геометрических параметров заготовок, и осуществить запрессовку при таких условиях не удалось. Основной причиной недостаточного изменения размеров заготовок стала высокая скорость выравнивания и нормализации температуры заготовок по всему объему, обусловленная тонкостенностью заготовок, высоким значением коэффициента теплопередачи. Однако после механической раздачи внутреннего диаметра охватывающей заготовки до величины в 15 мм и последующего термического воздействия по тем же режимам была осуществлена запрессовка заготовок на глубину порядка 5 мм. Макро- и микроструктура зоны соединения данного образца представлена на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что при данных условиях проведения запрессовки число участков, на которых граница раздела практически неразличима или исчезла полностью, резко повышается. При значительном увеличении (рис. 10, в) хорошо виден участок схватывания между поверхностями заготовок.

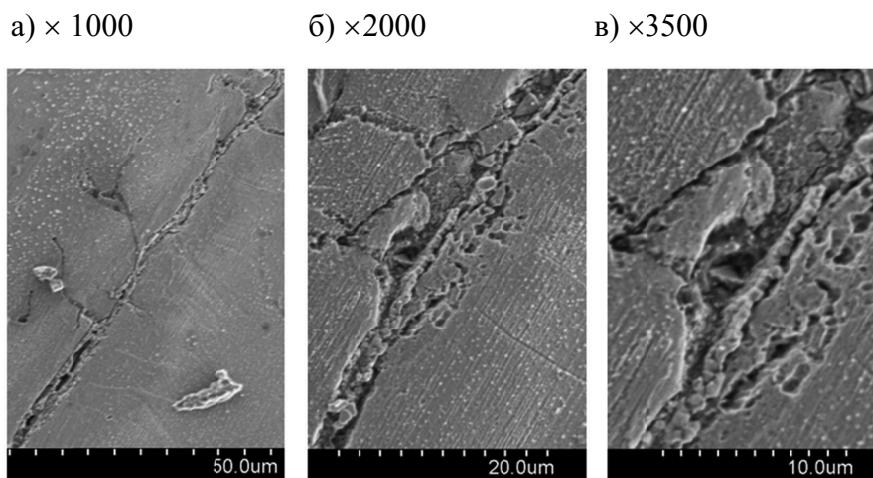


Рис. 10. Микроструктура титанового образца, полученного прессовой посадкой без токарной обработки зоны соединения

Таким образом, использование традиционного метода прессовой посадки как способа получения неразъемного соединения не целесообразно. Однако дальнейшие исследования в направлении значительного увеличения величины натяга в соединении, повышения чистоты поверхности заготовок, термического воздействия на заготовки для управления их геометрическими параметрами, а также определения способов активации процессов диффузионного взаимодействия позволят повысить эффективность данного процесса при получении твердофазных неразъемных соединений.

**Общие выводы**

1. Увеличение при прессовой посадке величины натяга в соединении и площади контакта приводит к увеличению необходимого усилия запрессовки. На этапах начала и завершения процесса запрессовки наблюдается сложная зависимость между этими параметрами, на основной стадии, наиболее протяженной, наблюдается практически линейная зависимость.

2. Увеличение величины натяга в соединении при прессовой посадке повышает прочность соединения. Зависимость между этими величинами носит явно не линейный характер – увеличение величины натяга на 25 % привело к повышению прочности прессового соединения более чем в два раза.

3. Для повышения интенсификации процесса образования физического контакта необходимо обеспечить высокую чистоту контактирующих поверхностей образцов.

4. Предварительное термическое воздействие на заготовки (охлаждение или нагрев) может быть использовано как метод управления их геометрическими параметрами. Однако применение предварительного нагрева или охлаждения на тонколистовых деталях недостаточно эффективно из-за высокой скорости выравнивания и нормализации температуры в общем объеме заготовки.

5. Для получения прочного неразъемного соединения посредством тугой посадки необходимо исключить возможность появления пластических деформаций в зоне соединения.

6. Традиционный метод тугой посадки как способ получения неразъемного соединения не эффективен в силу трудности обеспечения достаточного сближения поверхностей заготовок для образования физического контакта и схватывания.

7. Основными направлениями повышения эффективности метода прессовой посадки как способа получения неразъемного соединения в твердой фазе являются: значительное повышение величины натяга в соединении, повышение чистоты поверхности, дополнительное применение последующих методов активации процессов диффузионного взаимодействия.

**ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Каракозов, З. С. Сварка металлов давлением / З. С. Каракозов. – М.: Машиностроение, 1986 – 280 с.
- 2 Конюшков, Г. С. Специальные методы сварки давлением: учеб. пособие / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009 – 632 с.
- 3 Люшинский, А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. В. Люшинский. – М.: Изд. центр «Академик», 2006. – 208 с.
- 4 Муравьев, В. И. Исследование влияния диффузионных процессов взаимодействия порошковых частиц сплава 2М2А и листовых заготовок из сплава ВТ20 на свойства композиционных конструкций / В. И. Муравьев, А. Ф. Мельничук, П. В. Бахматов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 42-45.
- 5 Муравьев, В. И. К вопросу актуальности исследования сварки трением с перемешиванием конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, К. А. Мелкоступов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – №II-1(2). – С. 110-125.

**Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А.**  
**A. D. Verkhoturov, I. A. Podcherniaeva, L. A. Konevtsov**

**ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ТРИБОСТРУКТУРЫ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ  
ТВЁРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ  
ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

**IMPACT OF SECONDARY TRIBO-STRUCTURES ON THE OPERABILITY  
OF HARD-ALLOY CUTTING TOOLS WITH CUTTING EDGES PROTECTED  
BY ELECTRIC-SPARK ALLOY COATINGS**



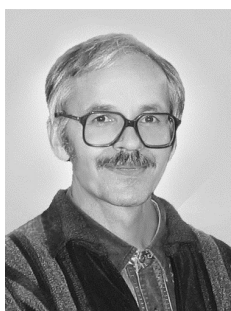
**Верхотуров Анатолий Демьянович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

**Mr. Anatoly D. Verkhoturov** – Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, Institute for Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru



**Подчерняева Ирина Александровна** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины (Украина, Киев). E-mail: iripodcher@gmail.com

**Ms. Irina A. Podchernyaeva** – Doctor of Engineering, Professor, Leading Research Fellow, Institute for Problems of Materials Technology, Ukrainian Academy of Sciences (Ukraine, Kiev). E-mail: iripodcher@gmail.com



**Коневцов Леонид Алексеевич** – научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

**Mr. Leonid A. Konevtsov** – Research Fellow, Institute for Materials Technology, the Khabarovsk Research Centre of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ru

**Аннотация.** Показано, что основными недостатками вольфрамсодержащих твёрдых сплавов являются недостаточно высокая красностойкость, жаростойкость, резкое увеличение износа рабочих поверхностей при температурах выше 740 °С, что требует их защиты, где одним из методов является ЭИЛ. При резании без смазки на поверхности режущей кромки системы Al/WK8 трибоокисление инициирует образование жаростойких сложных алюминатов вольфрама и полиоксидов, играющих роль твёрдой смазки.

**Summary.** The paper demonstrates that the main shortcoming of tungsten-comprising hard alloys is their insufficiently high red-hardness, heat resistance, and the sharp increase in deterioration of working surfaces at temperatures above 740 °C, which demands their protection, one of methods being the ESA. During cutting without cutting emulsion on a surface of a cutting edge of the Al/(W-Co8%) system, tribo-oxidation initiates formation of heat resisting compound aluminates of tungsten and polyoxides, playing the role of solid lubricant.

**Ключевые слова:** ЭИЛ, вольфрамсодержащий твёрдый сплав, режущий инструмент, окисление, износ.

**Key words:** ESA, tungsten-comprising hard alloy, cutting tool, oxidation, deterioration.

УДК 621.9.048.4

### Введение

Перспективной современной тенденцией в трибологии в условиях трения без смазочно-охлаждающей жидкости является создание новых материалов/покрытий, поверхность которых улучшает свои свойства в процессе жёстких условий эксплуатации на воздухе за счёт формирования на изнашиваемой поверхности вторичной структуры (трибоплёнки), играющей роль твёрдой смазки [1]. Существует два подхода в прогнозировании трибологического поведения контактирующих пар: 1) материаловедческий, в котором предполагается доминирующее влияние трибоплёнки на износостойкость узла трения; 2) механико-расчётный, в котором основная роль отводится усталостной прочности поверхностного слоя. В реальных условиях, по-видимому, необходимо учитывать оба фактора (формирование трибоплёнки и возникновение усталостных трещин). Согласно представлениям работы [2], состояние поверхности кардинально влияет на зарождение и распространение трещин в глубь нагруженного образца и, в конечном счёте, на механическую прочность изделия. С этой точки зрения свойства, структура и состав трибоплёнки, образующейся на рабочей поверхности режущего инструмента (РИ) в условиях трибонагружения в процессе резания, могут быть определяющими факторами.

В настоящее время РИ, в том числе из вольфрамсодержащих твёрдых сплавов (ВТС), преимущественно выпускают с защитными покрытиями для уменьшения коэффициента трения, увеличения трещиностойкости и стойкости к высокотемпературной коррозии. Такие покрытия на РИ наносят в основном с использованием различных вариантов методов газозащитного осаждения, плазменно-ионных технологий и их комбинации с другими методами [3-7]. Альтернативным способом нанесения износостойких, коррозионностойких покрытий может быть электроискровое легирование (ЭИЛ) с формированием легированного слоя (ЛС), отличающегося низкой температурой осаждения, простотой технологии, высокой прочностью сцепления ЛС с основой (~ 90 МПа) и низким потреблением мощности (0,2 – 0,7 кВт).

В качестве материала анода используют в основном карбонитриды титана, гафния, сложный нитрид (Ti, Al)N [3] и многослойные покрытия с комбинацией слоёв разного состава [8]. Полученный результат связывают, как правило, с физико-механическими характеристиками покрытия (вязкость, твёрдость, прочность связи с основой и др.) и его стойкостью к высокотемпературному окислению, игнорируя влияние на процесс изнашивания трибоплёнки, формирующейся в зоне трибоконтакта. В работе [9] было показано, что предварительное окисление поверхности композиционной керамики состава TiN-AlN существенно улучшает её трибологическое поведение за счёт образования на окисленной поверхности твёрдых растворов системы  $Al_2O_3-TiO_2$ . Это облегчает формирование полиоксидной вторичной трибоплёнки на основе указанных оксидных твёрдых растворов, которые прочно связаны с поверхностью композита TiN-AlN и могут играть роль твёрдой смазки при трении на воздухе.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния ЭИЛ переходными металлами IV-VI групп, алюминием, а также Ni, Cu и силуминовым Al-Si сплавом WC-содержащих сплавов на их стойкость к высокотемпературной коррозии, трибологическое поведение и кинетику электромассопереноса. Предполагалось, что в процессе окисления/трибоокисления ВТС с ЛС на исполнительной поверхности РИ будет образовываться полиоксидная окалина/трибоокалина, способствующая увеличению их коррозионной и износостойкости.



### Методика эксперимента

В качестве материала подложки (катода) использованы отечественные образцы наиболее распространённых следующих трёх групп ВТС: ВК системы WC-Co: ВК3, ВК6, ВК8, ВК8ИМ, ВК12С; ТК системы (WC-TiC)-Co: Т5К10, Т15К6, Т30К4 и ТТ системы (WC-TiC-TaC)-Co: ТТ8К7, ТТ10К8. Материал ВК8ИМ был получен в ИМ ХНЦ ДВО РАН. В качестве материала легирующих электродов использованы переходные металлы IV-VI групп, а также Al, Co, Ni, Cu. Кроме того, использовали коллоидный графит (С), а также для сравнения износостойкую композиционную керамику на основе ZrB<sub>2</sub> системы ZrB<sub>2</sub>-ZrSi<sub>2</sub>-LaB<sub>6</sub> со связкой Ni-Cr-Al (ЦЛ). Керамические электроды в виде штабиков получали методом горячего прессования под давлением при температуре ~ 1900 °С в ИПМ НАН Украины.

ЭИЛ осуществляли на установках “ЭЛФА-541”, “Элитрон-22А”, “Корона 1101”, “ИМ-ЭИ-01-2А”; для металлографического, дюрOMETрического, рентгенофазового, электронно-зондового анализов использовали следующую аппаратуру: EVO-50 XVP, D8 ADVANCE, WDS/EDS JXA-8100, ПМТ-3, DUW201 Shimadzu. Для исследования микроструктуры материалов анода, катода, продуктов эрозии – оптические микроскопы “МИМ-10”, “БИОЛАМ-М” и другие. Высокотемпературное окисление изучали на дериватографах Q-1000 и STA 449C Jupiter при нагреве образцов от 20 °С до 1000 °С со скоростью 20 °С в минуту с последующим охлаждением в печи ~ 500 °С и далее с открытой печью до комнатной температуры.

Для испытания стойкости РИ использовали быстросменные (3, 4, 5-гранные) пластины для токарных резцов с механическим креплением 25×20 (ГОСТ 21151-75). Покрытия наносили по передним и задним поверхностям на четырёх- и трёхгранных неперетачиваемых режущих пластинах из сплава ВК8. Величину износа режущей кромки пластины измеряли по задней грани (*h*) и передней режущей кромке (*l*) при вершине резца на металлографическом микроскопе МИМ-10 с точностью ±0,001 мм. Указанные параметры износа сопоставляли с параметрами работоспособности РИ, учитывающими конечные характеристики качества поверхностей обработанного материала. К ним, как известно из технологии машиностроения, относят параметры точности (РПФ): размер (Р), относительный поворот (Π), форму (Φ). Исследования стойкости ВТС выполняли при обработке прутков стали 45 диаметром 30 – 55 мм, длиной 400 мм, при режимах резания:  $t = 0,2 - 0,3$  мм,  $n = 1000 - 1800$  1/мин,  $s = 0,07$  мм/об на токарном станке 1К62.

### Повышение жаростойкости ВТС при ЭИЛ металлами

Основными недостатками ВТС являются их недостаточно высокая жаростойкость и жаростойкость, ограничивающие температуру эффективной эксплуатации до 740 °С. На основе полученных данных по изменению удельного прироста массы образцов при нагревании со скоростью 20 °С/мин от 25 °С до 1000 °С из модельных материалов: W, WC, Co, TiC, а также образцов металлокерамических материалов ВТС в дериватографе Q-1000 было установлено, что окисление исследуемых материалов ( $q$ , г/м<sup>2</sup>) до температуры 650 °С незначительно.

В этом диапазоне наибольшие величины принятого показателя окисления  $q$  получены для Co = 12,9 г/м<sup>2</sup>, W = 6,3 г/м<sup>2</sup>, WC = 0,7 г/м<sup>2</sup>. С повышением температуры до 1000 °С распределение материалов по жаростойкости меняется следующим образом: наибольшее значение  $q$  наблюдается для карбида WC, далее  $q$  уменьшается у металлокерамических материалов ВТС и наименьшее его значение фиксируется для TiC. Следует отметить, что при температуре 1000 °С удельный прирост массы WC превышает  $q$  вольфрама более, чем в 4 раза, а W окисляется по сравнению с TiC более, чем в 10 раз. То есть скорость окисления для вольфрама пропорциональна концентрации кислорода в степени <sup>3</sup>/<sub>2</sub>, а при окислении WC – <sup>5</sup>/<sub>2</sub>. Это, по-видимому, является доминирующим фактором по сравнению с влиянием концентрации [CO<sub>2</sub>], что и получается в результате реакции окисления WC. Сравнивая значения величин энтальпий образования TiC и WC, которые равны соответственно 45,657 ккал/г·атом и 3,968 ккал/г·атом (при 2000 К) [10], можно предположить, что скорости окисления этих ве-

ществ будут различны, что и подтвердилось экспериментально (см. рис. 1). Жаростойкость ВТС возрастает с увеличением содержания в них TiC, что наиболее заметно при содержании TiC > 10 %.

Это можно объяснить прочностью химической связи, которая определяется образованием вольфрама и титана с атомами углерода  $sp^3$ -конфигураций в карбидах WC и TiC [11, 12]. Так как для W характерен высокий статистический вес атомов с устойчивой конфигурацией (СВАСК)  $d^5$ , и в связи этим атомы W обладают слабыми донорными свойствами и практически не могут стабилизировать  $sp^3$ -конфигурации атомов углерода, то с повышением температуры WC имеет высокие значения  $q$ , разрушение локализованных электронов атомов C в  $sp^3$ -конфигурациях. В то время как увеличение доли нелокализованных электронов W обеспечивает WC повышенную пластичность, больший модуль упругости по сравнению с TiC.

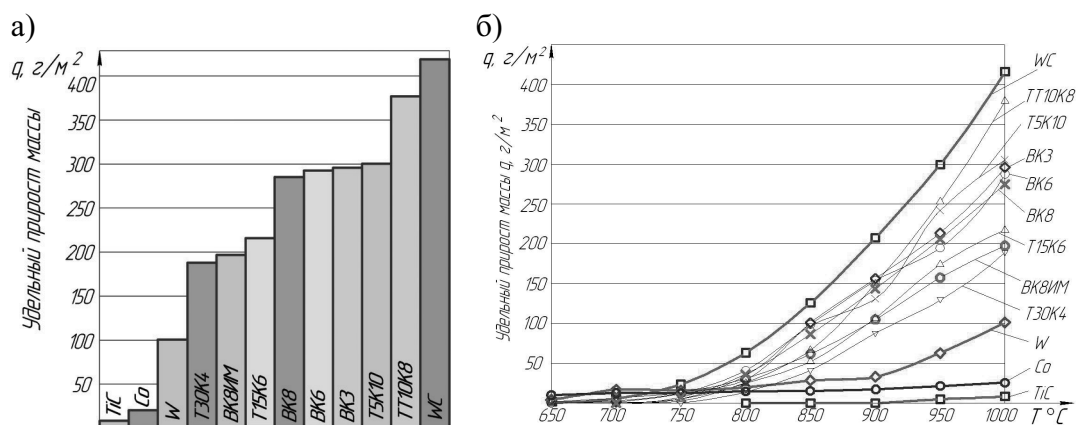


Рис. 1. Удельный прирост масс ВТС и их составляющих компонентов при  $T = 1000$  °C (а) и изменение удельного прироста массы в диапазоне рабочих температур при нагреве со скоростью 20 °C/мин до 1000 °C и охлаждении в течение 1 ч (б)

Понижение окисления TiC по сравнению с WC при нагревании связано с образованием стабильных  $sp^3$ -конфигураций атомов углерода, так как для TiC характерен больший СВАСК  $sp^3$ , что обуславливает жёсткую ковалентную связь, на разрушение которой требуется больше тепла. Этим же обуславливаются большая энергия связи для TiC чем для WC, снижение пластичности, модуля упругости, повышение хрупкости. Следствием является также снижение доли связанных электронов с  $[O_2]$  в константах равновесия при температурном окислении. Полученные данные согласуются с конфигурационной моделью электронной структуры вещества [12].

Повышение жаростойкости исследуемых образцов можно представить в виде следующего ряда: WC → TT10K8 → T5K10 → BK3 → BK6 → BK8 → T15K6 → BK8ИМ → T30K4 → W → Co → TiC.

Интерес представляет образование “нароста” окалины с высотой  $H$  (см. табл. 1).

Таблица 1

Средняя высота  $H_{ср}$  “нароста” окалины и показатель жаростойкости  $q$

| Исследуемый материал | $H_{ср}$ , мм | $q_2$ , $0,5 \cdot 10^{-2}$ г/м <sup>2</sup> | Исследуемый материал | $H_{ср}$ , мм | $q_2$ , $0,5 \cdot 10^{-2}$ г/м <sup>2</sup> |
|----------------------|---------------|--|----------------------|---------------|--|
| TiC                  | 0,01          | 0,05   | BK8                  | 1,57          | 1,41   |
| Co                   | 0,02          | 0,11   | BK6                  | 1,68          | 1,46   |
| W                    | 0,28          | 0,52   | BK3                  | 1,78          | 1,48   |
| T30K4                | 0,35          | 0,94   | T5K10                | 1,35          | 1,51   |
| BK8-ИМ               | 0,85          | 0,98   | TT10K8               | 0,88          | 1,78   |

Как показали данные РФА, “нарос” окалины имеет различный фазовый состав. При нагревании WC в Ag до 1000 °С он состоит главным образом из  $WO_3$ , а также содержит в верхней части тонкий слой кристаллов  $FeWO_4$ , что определяет различную микроструктуру его верхних и нижних слоёв (см. рис. 2). Каталитические свойства Fe, появившегося в виде примесей (0,5 – 3,0 %) при подготовке к температурным испытаниям материала “нараста”  $FeWO_4$  подтверждают вероятность преимущественного разрушения рабочей поверхности ВТС, контактирующей в процессе резания со сталью 45 в результате не абразивного, а химического износа.

а) “Нарост” на ВК8

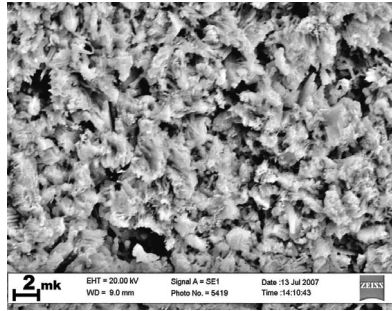
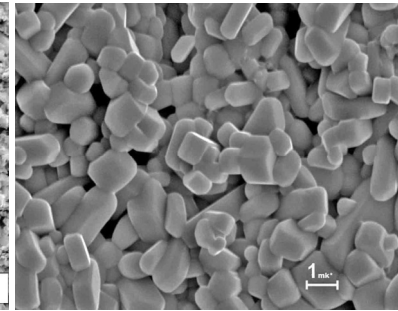
б)  $WO_3$ в)  $FeWO_4$ 

Рис. 2. Макро- (а) и микроструктура (б, в) “нараста” окалины образца WC: в нижней части слоя  $WO_3$  (б); в верхней:  $FeWO_4$  (в) при нагреве в Ag до 1000 °С

“Нарост” окалины хрупок, при резании металлов он легко удаляется с поверхности ВТС сходящей стружкой. Микротвёрдость нароста окалины для ВТС ВК6, ВК8, Т15К6, ТТ10К8 составляет в нижних слоях 0,2 – 0,4 ГПа и в верхних слоях 0,58 – 0,87 ГПа. При этом микротвёрдость ВТС под наростом окалины для ВК8 после нагрева повысилась на 0,4 ГПа (при твёрдости основы 16,1 ГПа), а у ВК6, Т15К6, ТТ10К8 снизилась на 1,5 – 2,0 ГПа (при твёрдости основы 16,8 – 17,9 ГПа).

Из сказанного выше можно сделать вывод о крайней необходимости образования защитного покрытия на поверхности металлокерамических режущих материалов из ВТС при их эксплуатации слоя из жаростойких материалов и их соединений, который должен повысить сопротивление окислению в диапазоне рабочих температур.

### Кинетика электропереноса при ЭИЛ и формирование фазового состава ЛС

Формирование поверхностного слоя на ВТС при ЭИЛ модельными материалами (переходные металлы IV-VI групп, Al, Cu, Ta, Ni) характеризуется непрерывным увеличением привеса катода с ростом длительности легирования. При этом повышаются толщина покрытия, сплошность, шероховатость поверхности и уменьшается коэффициент переноса, который снижается также с повышением процентного содержания TiC в ВТС. В качестве примера на рис. 3 показано изменение параметров электропереноса от числа проходов  $i$  электрода при ЭИЛ ВТС алюминием, медью, графитом и композитом ЦЛ на основе ZrB2. При ЭИЛ металлами Al, Cu масса катода непрерывно увеличивается (см. рис. 3, а), что указывает на благоприятные условия формирования ЛС, обусловленные растворимостью Al и Cu в Со-связке ВТС.

Коэффициент массопереноса  $K_{\Pi} = |\Delta_K|/|\Delta_A| \cdot 100\%$  (привес катода по отношению к убыли анода) для всех исследованных систем уменьшается с ростом числа проходов  $i$  электрода (см. рис. 3, б), причем величина  $K_{\Pi}$  при ЭИЛ алюминием выше по сравнению с ЭИЛ композитом ЦЛ. При ЭИЛ алюминием наибольшее значение  $K_{\Pi}$  достигается для подложки из сплава ВК8. Для подложек из двойных и тройных карбидных сплавов (WC-TiC)-Co, (WC-TiC-TaC)-Co величина  $K_{\Pi}$  уменьшается с повышением в сплаве содержания TiC. Это может свидетельствовать о том, что контактные углы смачивания TiC алюминием выше, чем WC. В то же время при ЭИЛ коллоидным графитом имеет место катастрофическая убыль массы

катода, что делает проблематичным его использование. По-видимому, интенсивное окисление графита с образованием легколетучих оксидов  $CO_2$  разрыхляет поверхностный слой твёрдосплавного катода, способствуя его интенсивному разрушению под действием искрового разряда.

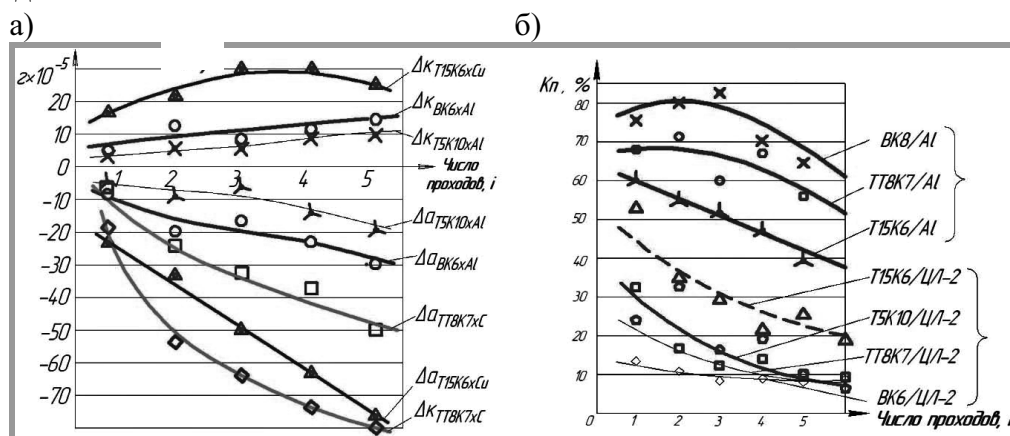


Рис. 3. Изменение привеса массы катода  $\Delta_K$ , убыли массы анода  $\Delta_a$ , (а) и коэффициента массопереноса  $K_{п}$  (б) для систем ЭИЛ-покрытие/ВТС (основа) от числа проходов электрода  $i$  (установка “ЭЛФА-541”)

На рис. 4 показано влияние параметров импульса на временные зависимости суммарного привеса и коэффициента переноса при ЭИЛ танталом и титаном: с увеличением энергии и тока в импульсе значения  $\Sigma \Delta_K$  и  $K_{п}$  возрастают.

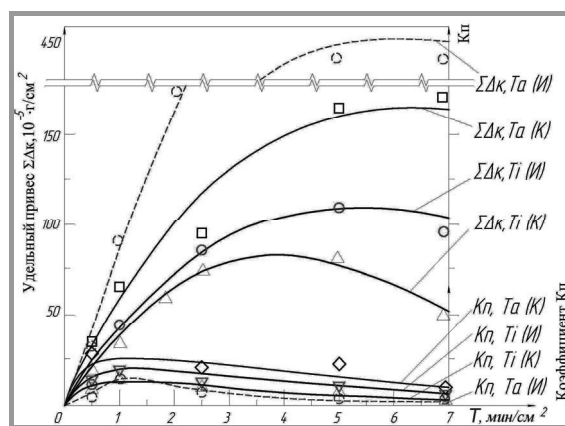


Рис. 4. Изменение удельного привеса катода ВК8 ( $\Sigma \Delta_K$ ) и коэффициента массопереноса ( $K_{п}$ ) от удельного времени легирования ( $T$ , мин/см<sup>2</sup>) титаном и танталом (на установках "И" ("ИМЭИ-01-2А":  $I = 1,6$  А;  $U = 35$  В;  $E = 26,8$  Дж/мин) и "К" ("КОРОНА-1101":  $I = 0,7$  А;  $U = 40$  В;  $E = 10,1$  Дж/мин)

Результаты исследования физико-химических свойств ЛС от времени легирования представлены на рис. 5.

Показано постепенное заполнение поверхности катода продуктами эрозии материала анода (Ti) и формирование ЛС на начальном этапе ( $T = 0,5; 1,0; 2,5$  мин/см<sup>2</sup>), когда удельный прирост массы катода  $\Delta_K$  повышается до значения  $T = 4 - 5$  мин/см<sup>2</sup> с последующим его уменьшением в результате хрупкого разрушения поверхности катода за счёт накопления остаточных напряжений.

В табл. 2 показано изменение фазового состава электроискрового покрытия в процессе его нанесения на примере системы Ti/ВК8 (катод).

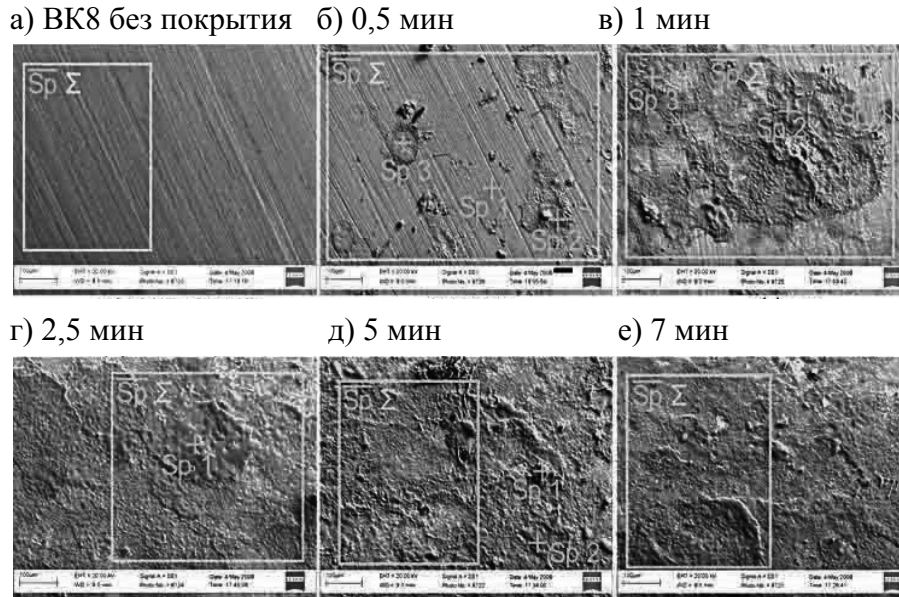


Рис. 5. Микроструктура исходной поверхности VK8-катода (а) и её изменение после ЭИЛ титаном с ростом  $T$  (б – е)

Таблица 2

Изменение фазового состава легированного слоя с увеличением времени ЭИЛ ( $T$ ) в системе Ti/VK8 (катод)

| $T$ , мин/см <sup>2</sup> | Фазы в порядке убывли интенсивности рентгеновских линий   |
|---------------------------|---|
| 0                         | WC <sub>куб</sub> , Co <sub>куб</sub>   |
| 0,5                       | WC <sub>куб</sub> , $\beta$ -W <sub>куб</sub> , CoO <sub>куб</sub> , WC <sub>1-x</sub> , куб,                         |
| 1                         | WC <sub>куб</sub> , $\beta$ -W <sub>куб</sub> , CoO <sub>куб</sub> , CoTiO <sub>3</sub> гекс                          |
| 2,5                       | WC <sub>куб</sub> , CoTiO <sub>3</sub> гекс, WC <sub>1-x</sub> , $\beta$ -W <sub>куб</sub>                            |
| 5                         | WC <sub>куб</sub> , CoTiO <sub>3</sub> гекс, WC <sub>1-x</sub> , куб, $\beta$ -W <sub>куб</sub>                       |
| 7                         | WC <sub>куб</sub> , CoTiO <sub>3</sub> гекс, TiN <sub>гекс</sub> , WC <sub>1-x</sub> , куб, $\beta$ -W <sub>куб</sub> |
| 7*                        | Ti <sub>гекс</sub> , TiO <sub>2</sub> тетра   |

\*) рабочая поверхность Ti-электрода

Анализ табличных данных приводит к следующему заключению. В процессе ЭИЛ происходят интенсивное фазообразование и окисление легированного слоя. Основной фазой поверхности во всем временном диапазоне ЭИЛ сохраняется исходный монокарбид вольфрама, наряду с которым уже не первом этапе ЭИЛ ( $T \leq 2,5$  мин/см<sup>2</sup>) появляются оксид и титанат кобальта (CoO<sub>куб</sub>, CoTiO<sub>3</sub>), а также продукты диссоциации карбида вольфрама (WC<sub>1-x</sub>,  $\beta$ -W<sub>куб</sub>). Формирование фазового состава поверхности завершается в основном к моменту  $T \leq 2,5$  мин/см<sup>2</sup>. Обращает внимание образование в легированном слое нитрида титана при длительном ЭИЛ ( $T = 7$  мин/см<sup>2</sup>) за счёт азота воздуха. Эти выводы подтверждаются временными зависимостями элементного состава легированного слоя (см. рис. 6). Таким образом, в процессе ЭИЛ сплава VK8 титаном основными фазами поверхности за период  $T = 2,5 \dots 5$  мин/см<sup>2</sup>, соответствующий рабочему времени обработки, являются WC<sub>куб</sub> и CoTiO<sub>3</sub>.

На рис. 7, а показана микроструктура поперечного сечения образца системы Al/VK8 совместно с распределением элементов O, Al, Co, W (рис. 7, б). Эти данные свидетельствуют о формировании слоистой структуры покрытия, состоящей из трёх участков (I-III). Участки отличаются фазовым составом за счёт конвекции и градиента температур в ванне расплава, высокотемпературного окисления, взаимодействия и селективности смачивания легирующих компонентов материалом подложки.

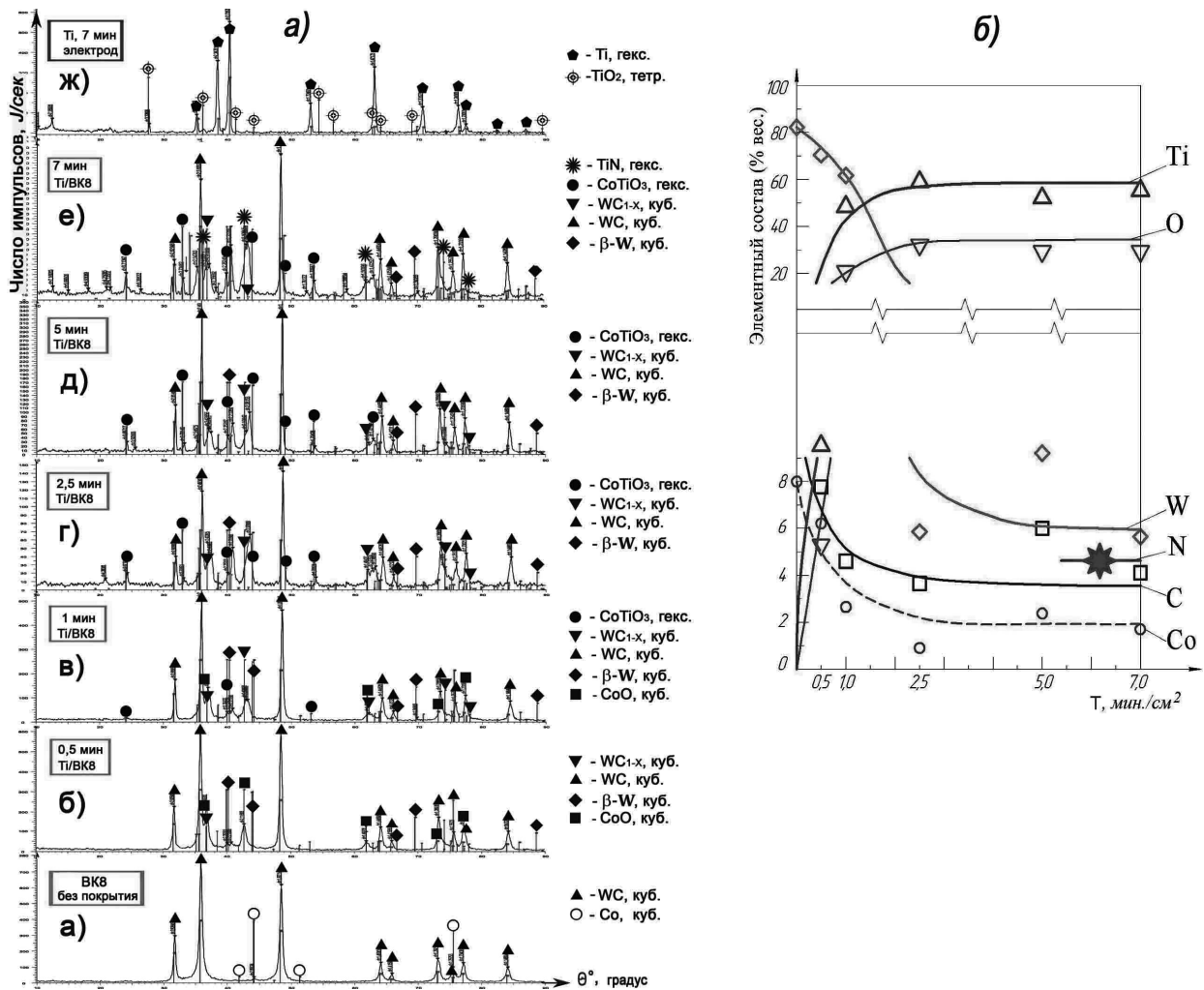


Рис. 6. Зависимость элементного состава легированного слоя от времени обработки ( $T$ ) в системе Тi/ВК8 (катод): а – Тi, О; б – W, N, С, Со

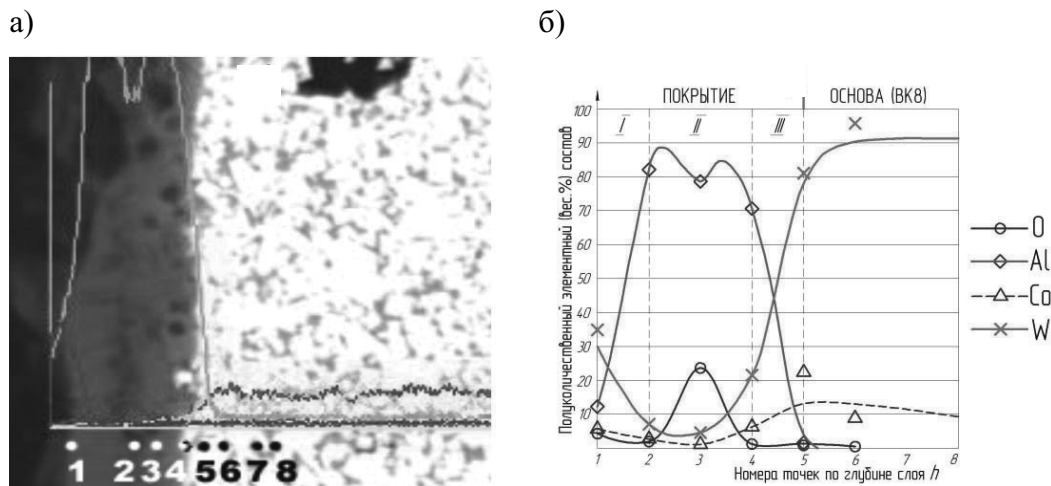


Рис. 7. Изменение элементного состава в поперечном сечении косоугольного среза (45°) образца после ЭИЛ в системе Al/ВК8 (катод) по точкам 1-8 отбора проб (а) и в разных участках легированного слоя (б) при  $T = 6 \text{ мин/см}^2$

Во внутреннем слое III, примыкающем к подложке, характер распределения W, Co и Al свидетельствует о возможности существования на границе “покрытие – основа” твёрдого раствора алюминия в кобальте. В промежуточном слое II количество W и Co резко уменьшается и основной фазой является оксид алюминия, о чём свидетельствует совпадение концентрационных максимумов Al и O. В рабочем наружном слое I за счёт диффузионного массопереноса соотношение элементов изменяется так, что основными компонентами становятся W, Al, Co и O.

Таким образом, уже на этапе нанесения на воздухе электроискрового покрытия из алюминия на сплав BK8 за счёт высокотемпературных процессов окисления и диффузионного массопереноса из подложки формируется трёхслойное покрытие переменного состава системы W-Al-Co-O. Можно предположить, что при резании без смазки на поверхности режущей кромки системы Al/BK8 (катод) трибоокисление будет инициировать образование жаростойких сложных алюминатов вольфрама. Это подтверждается микрорентгеноспектральным анализом поверхности режущей кромки пластины BK8 с ЭИЛ-покрытием из сплава AL25 (25 % Si) после обработки резанием детали из сплава ХВГ (HRC 50-55) (см. рис. 8).

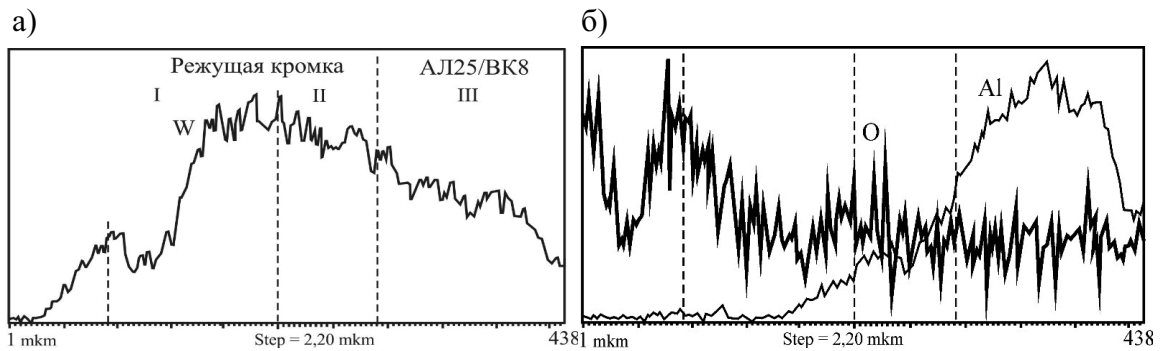


Рис. 8. Спектры МРСА по длине поверхности режущей кромки с ЭИЛ-покрытием системы AL25/BK8 после обработки резанием

Основной фазой такого покрытия является алюминий с уменьшенным параметром решётки, очевидно, вследствие растворения Co (см. рис. 9).

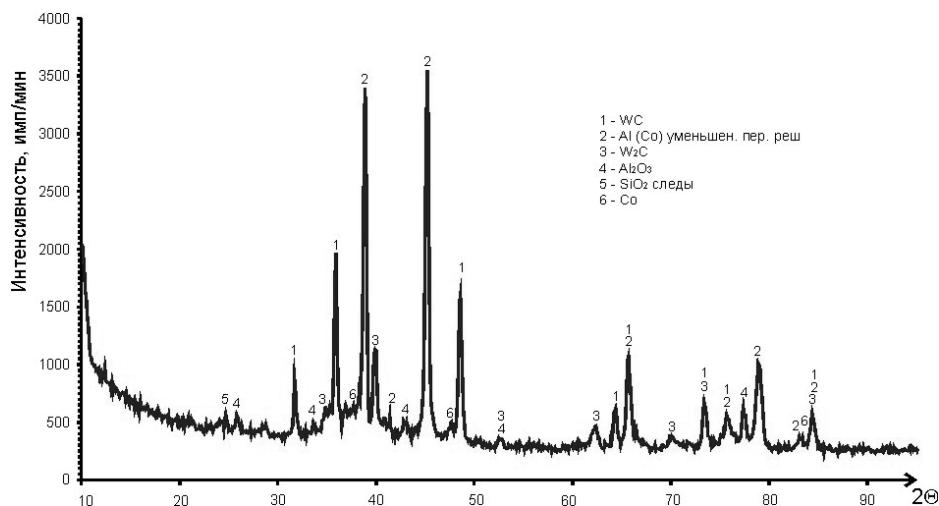


Рис. 9. Дифрактограмма с поверхности ЭИЛ-покрытия системы AL25/BK8

Наличие карбидных фаз WC и W<sub>2</sub>C обусловлено несплошностью легированного слоя. Покрытие характеризуется развитой поверхностью (см. рис. 10, б) за счёт большого количества глубоких сфероидизированных кратеров, формирующихся вследствие выброса материала с поверхности ЛС преимущественно в жидко-паровой фазе в процессе осаждения покрытия.

На поверхности износа режущей кромки (РК) с Al-Si электроискровым покрытием в наружном слое обнаружены два концентрационных максимума в системе W-Al-Co-Si-O, свидетельствующих о формировании в условиях трибоокисления вторичной структуры переменного состава в направлении увеличения рабочей температуры поверхности  $T_p$ .

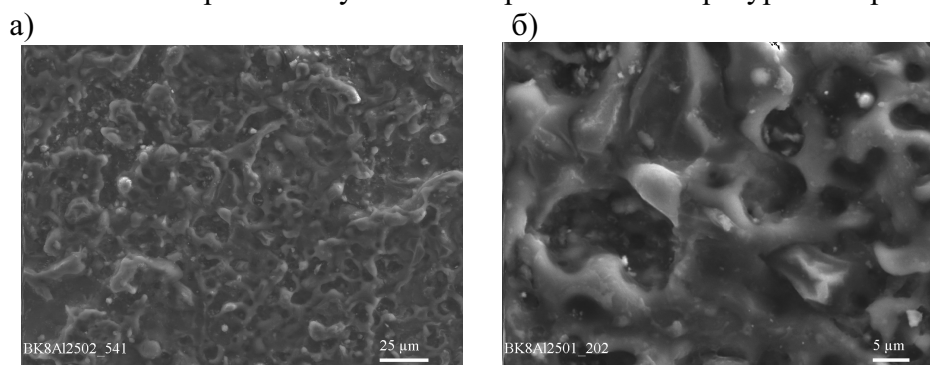


Рис. 10. Морфология исходной поверхности ЭИЛ-покрытия системы AL25/BK8

Количество алюминия убывает в этом направлении, вероятно, за счёт его интенсивного испарения. Распределение элементов в зоне концентрационного максимума I (см. рис. 9) свидетельствует о наличии в области, примыкающей к РК, сложных оксидов систем W-Co-O и Co-Si-O. В зоне концентрационного максимума II, наряду со шпинелями на основе Co, могут присутствовать алюминаты вольфрама системы W-Al-Co-O.

Результаты изменения элементного состава передней и задней поверхностей резца BK6 без покрытия представлены на рис. 11. Установлено, что на передней и задней поверхностях резца BK6 без покрытия образуются продольные темно-серые канавки, содержащие преимущественно (обозначено +) Fe > 50 – 80 %, и возвышенные светлые участки W > 60 – 80 %. Так как температура и давление на рабочих поверхностях при резании неравномерны, на участках с высокими температурой и давлением интенсивнее образуется оксид  $WO_3$  и шпинель  $CoWO_4$ . При этом часть W тратится на образование кристаллов  $FeWO_4$ , что способствует износу (как установлено, рис. 2), так как образовавшиеся продукты легко удаляются стружкой, сходящей в процессе резания.

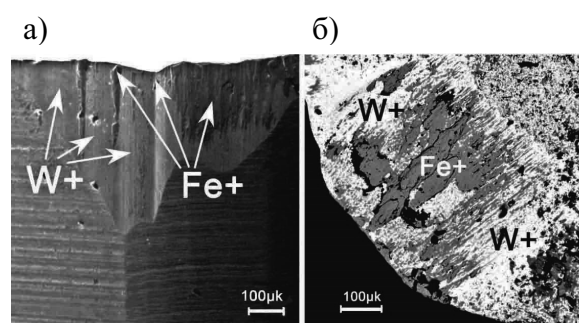


Рис. 11. Изношенная поверхность резца BK6 без покрытия по задней (а) и передней (б) граням. Режимы резания:  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  $s = 0,07 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,2 \text{ мм}$ ; сталь 45;  $d_{\text{ср}} = 45 \text{ мм}$

Сравнительными испытаниями размерной стойкости ВТС без покрытия и с ЭИЛ-покрытием из металлов Ti, Zr, Al и из композита ЦЛ выявлено изменение характера стойкости РИ при чистовой обработке валов по параметрам конечного качества РИ при резании – размеру, повороту, форме (РПФ). Так, при ЭИЛ алюминием в системе Al/T15K6 после 4 проходов (“ЭЛФА-541”) погрешность РПФ от пути резания  $L$  после чистовой обработки валов ( $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ;  $s = 0,07 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,25 \text{ мм}$ ;  $l = 250 - 450 \text{ мм}$ ; сталь 45) меньше, чем без покрытия: по погрешности формы в ~1,5 раза (не превышает 20 – 25 мкм при  $L = 2 \text{ км}$ ), по конусности (относительный поворот образующей вала к оси) в 1,6 – 1,7 раз (не превышает 35/300 мкм/мм при  $L = 2 \text{ км}$ ). Погрешность диаметра уменьшается в ~1,3 раза и составляет



30 мкм при  $L=2$  км. Положительное влияние Al на триботехнические характеристики ВТС свидетельствует о том, что ЭИЛ является структуро- и фазообразующей технологией за счёт высокотемпературного окисления продуктов электроэрозии в межэлектродном промежутке, их взаимодействия и конвективного перемешивания в микрощельной расплава на поверхности катода.

### Выводы

1. В процессе окисления/трибоокисления ВТС с ЛС на исполнительной поверхности РИ образуется полиоксидная окалина/трибоокалина, способствующая увеличению их коррозионной и износостойкости.

2. При ЭИЛ Al/BK8 на воздухе за счёт высокотемпературных процессов окисления и диффузионного массопереноса из подложки формируется трёхслойное покрытие переменного состава системы W-Al-Co-O. При резании без смазки на поверхности режущей кромки системы Al/BK8 трибоокисление инициирует образование жаростойких сложных алюминатов вольфрама, что подтверждается микрорентгеноспектральным анализом поверхности режущей кромки пластины BK8 с ЭИЛ-покрытием из сплава Al25 (25 % Si) после обработки резанием сплава ХВГ.

3. На поверхности износа режущей кромки с Al-Si ЭИЛ-покрытием, в наружном слое (в системе W-Al-Co-Si-O) формируется в условиях трибоокисления вторичная структура переменного состава в направлении увеличения рабочей температуры поверхности с уменьшением Al, играющая роль твёрдой смазки. Распределение элементов в зоне концентрационного максимума свидетельствует о наличии в области, примыкающей к РК, сложных оксидов систем W-Co-O и Co-Si-O наряду со шпинелями на основе Co и алюминатов вольфрама системы W-Al-Co-O.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Donnet, C. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings / C. Donnet, A. Erdemir // Surface and coatings technology. – 2004. – V.180-181. – P. 76-84.
2. Панин, В. Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твёрдом теле / В. Е. Панин, А. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7-15.
3. Tool coating AIDS titanium cutting // Metalwork, PROD. – 1991. – V.135. – № 12 – P. 28.
4. Пат. 254489. Япония. N. Otori, K. Yamadata, T. Nomura et. al. – Публ. 18.04.1991.
5. Разработка и создание слоистых материалов инструментального назначения с заданным градиентом свойств / В. С. Фадеев, А. Д. Верхотуров, Н. М. Паладин [и др.] //Перспективные материалы. – 2004. – № 5. – С. 45-52.
6. Влияние комбинации газофазного осаждения с электроискровым легированием на износостойкость твердого сплава BK8 / О. В. Степанова, И. А. Подчерняева, И. И. Тимофеева [и др.] // Порошковая металлургия. – 2006. – № 7/8. – С. 49-55.
7. Костюк, Г. И. Методика расчета процесса теплообмена в зоне обработки при комбинированном упрочнении на базе электронно-лучевой и плазменно-ионной обработки и ионного азотирования / Г. И. Костюк, М. Э. Суккариев // Компьютерные и информационные технологии при моделировании в управлении и экономике. – 2010. – Кн. 2. – С. 235-242.
8. Matthews, A. Developments in vapour deposited ceramic coatings for tribological applications / A. Matthews, A. Zeyland //Key Eng. Mat. – 2001. – V. 206-213. – P. 459-466.
9. Фрикционные свойства композиционных материалов системы TiN-AlN / Т. В. Мосина, А. Д. Панасюк, А. И. Юга, О. Н. Григорьев // Порошковая металлургия. – 1999. – № 9/10. – С. 104-108.
10. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения: справочник / Г. В. Самсонов, И.М. Винницкий. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1976. – 558 с.
- 11 Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твёрдом теле / Г. В. Самсонов, Л. Ф. Прядко, И.Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 338 с.
12. Самсонов, Г. В. Конфигурационная модель вещества / Г. В. Самсонов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 230 с.

Подчерняева И.А., Верхотуров А.Д., Панашенко В.М., Коневцов Л.А.

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ И КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА

Подчерняева И. А., Верхотуров А. Д., Панашенко В. М., Коневцов Л. А.  
I. A. Podchernyaeva, A. D. Verkhoturov, V. M. Panashenko, L. A. Konevtsov

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ И КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ  
ТИТАНА

ELECTRIC SPARK SURFACE HARDENING AND INTEGRATED SURFACE  
HARDENING OF TITANIUM



**Подчерняева Ирина Александровна** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины (Украина, Киев). E-mail: iripodcher@gmail.com.  
**Ms. Irina A. Podchernyaeva** – Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, Frantsevich Institute for Problems of Materials Technology (Ukraine, Kiev). E-mail: iripodcher@gmail.com.



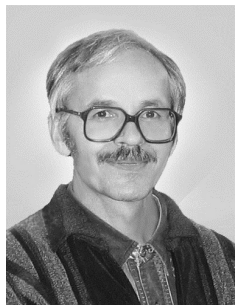
**Верхотуров Анатолий Демьянович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

**Mr. Anatoly D. Verkhoturov** – Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, Institute for Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru



**Панашенко Виктор Михайлович** – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины (Украина, Киев). E-mail: panavic@ipms.kiev.ua

**Mr. Victor M. Panashenko** – Research Fellow, Frantsevich Institute for Problems of Materials Technology (Ukraine, Kiev). E-mail: panavic@ipms.kiev.ua



**Коневцов Леонид Алексеевич** – научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

**Mr. Leonid A. Konevtsov** – Research Fellow, Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ru

**Аннотация.** Показано влияние на износостойкость электроискрового и комплексного упрочнения поверхности титана цирконий- и борсодержащими материалами. Показаны результаты исследований структурно-фазовых превращений на поверхности электроискровых и лазерно-электроискровых  $ZrB_2$ -содержащих покрытий на титановых сплавах в процессе их нанесения, а также влияния технологии комплексного упрочнения на прирост твёрдости в поверхностном слое и повышение сопротивления абразивному износу.



**Summary.** The paper demonstrates how treatment with Zirconium/Boron-based substances impacts upon the wear resistance of electric spark hardened surfaces and integrated-hardened surfaces of Titanium. Results are shown of an investigation of structural phase changes in  $ZrB_2$ -based electric spark coatings and laser/electric spark coatings during their application upon Titanium alloys. Also considered is the impact of the method of integrated hardening upon hardness gain in the surface layer and abrasive damage resistance increase.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, лазерное оплавление, титан, поверхность, абразивный износ, твёрдость.

**Key words:** electric spark alloying, laser infusion, Titanium, surface, abrasive wear, hardness

УДК 621.891

### Введение

Обладая высокой удельной прочностью, высокими антикоррозионными свойствами, титан и его сплавы находят широкое применение в промышленности и имеют тенденцию ко все большему применению в самых различных отраслях, в том числе ведущих направлениях развития передовых технологий. До 75 – 80 % от общего объёма производства титана используется в ракетно-космической, авиационной технике, судостроении [1].

Однако титан и его сплавы имеют ряд сравнительно низких значений некоторых физико-механических и эксплуатационных свойств, затрудняющих его использование. Это, прежде всего, низкие характеристики при работе на трение и износ. Титан и его сплавы при трении на воздухе имеют высокий коэффициент трения и значительный износ. Низкие антифрикционные свойства из-за высокого коэффициента трения являются одним из существенных недостатков титана. Как показано в [2 – 5], до сих пор не найдено материала, удовлетворительно работающего в паре с неупрочнённым титаном. Исследования показывают, что титан и его сплавы при работе с другими металлами либо переносятся (налипают) на поверхность более твёрдого металла, либо на поверхность титана происходит перенос более мягкого металла. В таких парах происходит взаимный перенос материалов, что снижает эффективность их использования в парах трения.

С другой стороны, особенностью титана и его сплавов является высокая склонность к контактному схватыванию при трении. Это свойство создаёт известные трудности при обработке титана и его сплавов резанием и делает опасным их применение в ответственных узлах механизмов и машин, т.к. может произойти заклинивание деталей узлов трения. Большая склонность титана и его сплавов к задирам практически не позволяет применять эти материалы для изготовления деталей, работающих в условиях контактного трения.

При высоких температурах (более 700 °С) в титане и его сплавах изменяются фазовый и химический составы поверхностных слоёв. Эти изменения связаны с газовой коррозией и ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )-переходами или распадом  $\beta$ -твёрдого раствора титана в  $\beta$ -сплавах.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для снижения коэффициента трения, уменьшения склонности к контактному схватыванию, задирам, повышения жаростойкости, коррозионной стойкости титана и его сплавов необходимо использовать поверхностное легирование и упрочнение. В настоящее время наука и техника располагают значительным набором методов в этом направлении. В [6] показано, что для поверхностного упрочнения титана и его сплавов имеет перспективы метод электроискрового легирования (ЭИЛ), отличающийся эффективностью, простотой и низкой энергоёмкостью.

Ранее для упрочнения методом ЭИЛ титана и его сплавов использовались материалы, преимущественно: Al, Ni, NiAl, C (графит МПГ6), сплавы T15K6, BK6, Co, V, Mo, Pb, Hf, W, Ag, сплавы на основе  $(TiCr)B_2$ ,  $TiC(Ni+Mo)$ ,  $B_4C$ +сталь X17H5,  $B_4C+SiC$ ,  $B_4C+TiB_2$ , TiC, ZrC, NbC,  $Cr_3C_2$ ,  $Cr_3C_2+15\%Ni$ ,  $(TiCr)B_2$ , V20H80 (нихром) [3, 6-9].

Однако в литературе нет обоснованных данных по выбору электродных материалов для ЭИЛ, например, повышения износостойкости и снижения коэффициента трения Ti и его сплавов в комбинации с другими методами. В связи с этим представляет интерес композиционная керамика на основе  $ZrB_2$ -SiC и AlN- $ZrB_2$  с жаростойкими добавками, которая принадлежит новому поколению износостойких высокотемпературных материалов, а также исследование процесса формирования легированного слоя (ЛС) и его свойств при ЭИЛ Ti и его сплавов электродами на основе  $ZrB_2$  и  $TiB_2$ , в том числе при ЭИЛ с последующим лазерным оплавлением (ЛО).

#### Методика и материалы

В качестве легирующих электродов использовали псевдосплавы на основе  $ZrB_2$  и  $TiB_2$  (табл. 1), полученные в ИПМ НАНУ, для сравнения использовали стандартные сплавы ВТ20, ВКЗ.

ЭИЛ проводили на воздухе с использованием высокочастотной установки “Элитрон-21” с ручным вибратором на следующем режиме: частота импульсов тока  $f = 1200$  Гц, энергия в импульсе  $E = 0,08$  Дж, время обработки  $t = 7$  мин. Для сравнения использовали также электроды ЦБСАН системы AlN- $TiB_2$ - $TiSi_2$ . Электроды были получены горячим прессованием, имели пористость  $\Pi \leq 3\%$  и размер зерна  $d \leq 2 - 3$  мкм.

Таблица 1

Состав электродных материалов и последовательность упрочнения ЭИЛ и ЛО поверхности образца единичной площади  $1 \text{ см}^2$

|    | Анод   | Состав анода                      | Твёрдая фаза:<br>$\Sigma C_{\text{тв.ф.}}$ , об.%<br>( $ZrB_2$ , $LaB_6$ , SiC) | Боридная фаза С,<br>об. % |         | Примечание |
|----|--------|-----------------------------------|---|---------------------------|---------|------------|
|    |        |                                   |   | $ZrB_2$                   | $TiB_2$ |            |
| 1  | ВТ20   | 6Al-2Zr-2V-1 Mo-0,2Fe             |   |                           |         | Без ЭИЛ    |
| 2  | ВКЗ    | WC + 3% Co                        |   |                           |         | ЭИЛ 7 мин  |
| 4  | ТХБФ   | (Ti,Cr) $B_2$ , FeCr              |   |                           | 80,32   |            |
| 4' | ЦЛАБ-1 | $LaB_6$ , $ZrB_2$ , NiCr          | 86,66   | 27,47                     |         |            |
| 3  | ЦБСАН  | AlN, $ZrB_2$ , $ZrSi_2$           | 29,96   | 29,96                     | 46,19   |            |
| 5  | ЦЛАБ-3 | $ZrB_2$ , $LaB_6$ , SiC, $ZrSi_2$ | 89,42   | 37,29                     |         | ЭИЛ 2 мин  |
| 6  |        |                                   |   |                           |         | ЭИЛ+ЛО     |
| 8  |        |                                   |   |                           |         | ЭИЛ+ЛО     |
| 7  | ЦЛАБ-2 | $ZrB_2$ , $LaB_6$ , $ZrSi_2$      | 77,03   | 59,05                     |         | ЭИЛ 7 мин  |
| 9  |        |                                   |   |                           |         | ЭИЛ+ЛО     |

В качестве материала подложки использовали сплав ВТ20 (для сравнения ВТ1-0). Кинетика процесса ЭИЛ оценивалась удельным изменением веса анода и катода в  $\text{г/см}^2$ .

Лазерное оплавление ЭИЛ-покрытия (ЭИЛ+ЛО) осуществляли в Ar с использованием непрерывного лазера “ЛТН-103” (длина волны излучения 1,06 мкм, плотность мощности  $40,8 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ , скорость сканирования 3 мм/с) и на воздухе с использованием импульсного лазера “КВАНТ-15” (длина волны 1,06 мкм, длительность импульса  $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$  с, частота импульсов  $f = 10$  Гц, плотность мощности  $6,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ ). В обоих случаях имело место гауссовское распределение плотности мощности в пятне нагрева.

Рентгенофазовый анализ рабочих поверхностей проводили на установке “ДРОН-3” в  $\text{CuK}_\alpha$  излучении, микротвёрдость измеряли при нагрузке 0,5 Н на приборе “ПМТ-3”. Микрорентгеноспектральный анализ, микроструктуру и топографию поверхности в характеристическом излучении изучали на микроанализаторах “Camebax SX-50” и “Jeol Superprobe 733”, снабжённых приставками для элементного анализа. Перед исследованием образцы подвергали ультразвуковой очистке в ацетоне.

Испытания на абразивную износостойкость проводили на воздухе на машине трения “НАУУ” (см. рис. 1), используемой для сравнительной оценки износостойкости материалов и покрытий при трении в условиях нежёстко закреплённого абразива.

Принятый в исследованиях метод определения износостойкости соответствует ГОСТ 23.208-79 и близок к американскому стандарту “ASTM G65-04”. Испытуемый образец с покрытием размером 30×30 мм прижимается резиновым роликом диаметром 50 мм, при вращении которого в зону контакта подаётся абразив. Усилие прижима регулируется нагрузкой. Испытания проводили при скорости скольжения 0,163 м/с и нагрузках 44,1 Н и 84,2 Н. В качестве абразива использовали кварцевый песок (SiO<sub>2</sub>) зернистостью 100 – 160 мкм. Износ измеряли гравиметрически с точностью 0,0001 г. Объёмный износ оценивали с учётом плотности наносимого материала.

### Результаты и обсуждение

Микроструктура поверхности ЭИЛ-покрытия (ЦЛАБ-2)/ВТ20 для времени обработки  $t = 7$  мин (с удельным привесом образцов, г/см<sup>2</sup>) представляет собой типичную для ЭИЛ-покрытий структурно неоднородную поверхность, сформированную с участием затвердевшей жидкой фазы в виде сглаженных участков поверхности I (см. рис. 2). Такие участки хаотично распределены в общем поле более грубой поверхности II (см. рис. 2, а).

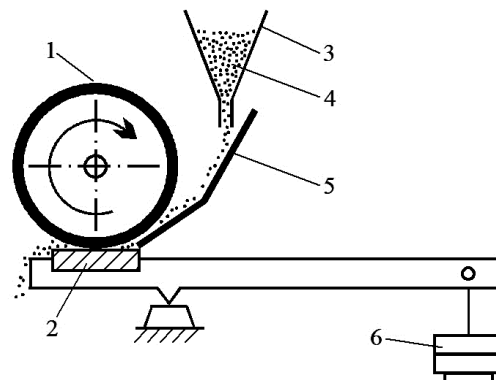


Рис. 1. Схема машины трения в условиях нежёстко закреплённого абразива:

- 1 – резиновый ролик; 2 – образец;
- 3 – дозатор; 4 – песок; 5 – лоток;
- 6 – нагрузка

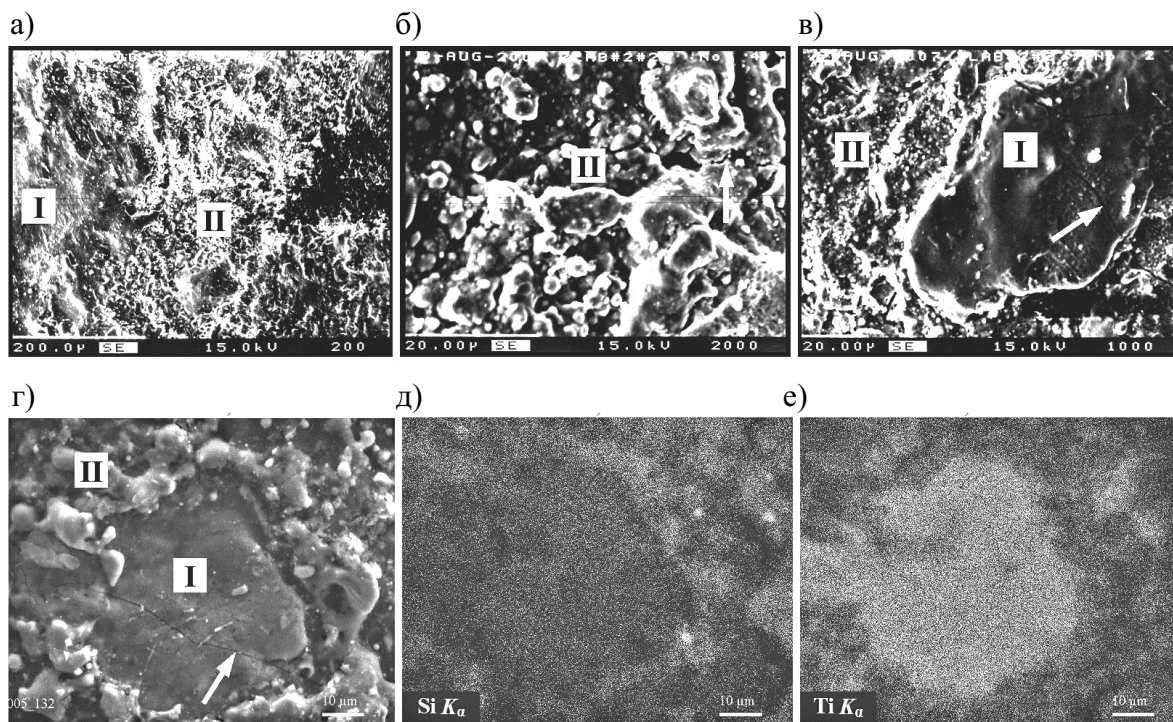


Рис. 2. Микроструктура поверхности ЭИЛ-покрытия системы (ЦЛАБ-2)/(ВТ1-0):

I – участок модифицированного Ti-сплава, II – поверхность ЭИЛ (стрелками указаны трещины); распределение элементов (д, е): SiK<sub>α</sub> (д), TiK<sub>α</sub> (е)

Микрорентгеноспектральный анализ (см. рис. 3) и топография поверхности (см. рис. 2) показывают, что участки I представляют собой Ti-сплав, модифицированный продуктами электроэрозии электрода вследствие их вовлечения в ванну расплава путём конвекции в процессе ЭИЛ.

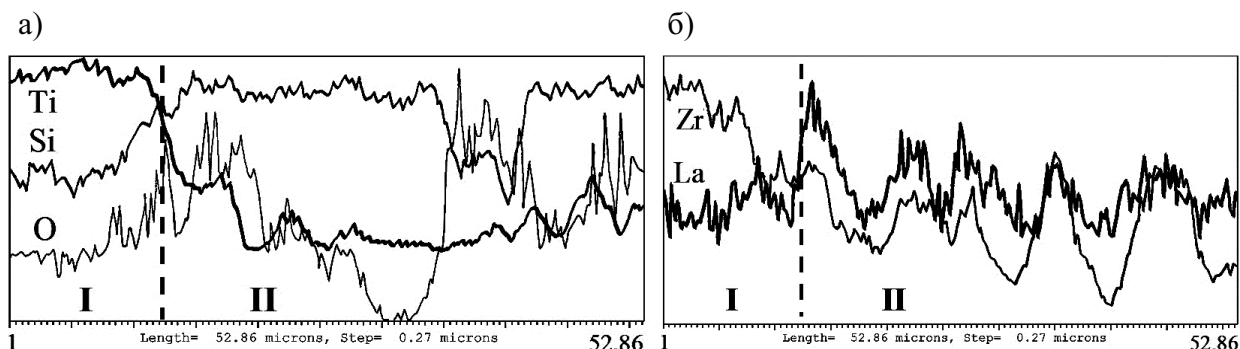


Рис. 3. Распределение элементов на исходной поверхности покрытия (ЦЛАБ-2) /BT20: а – Ti, Si, O; б – Zr, La; I – участок модифицированного Ti-сплава; II – поверхность ЭИЛ

Капли затвердевшей жидкой фазы, часто наблюдаемые на поверхности ЭИЛ-покрытия, могут быть обусловлены разбрызгиванием ванны расплава, образующейся на поверхности подложки, подвергнутой искровым импульсам.

Даже при времени ЭИЛ  $t = 7$  мин на поверхности образцов отсутствует регулярная сетка трещин (см. рис. 2, а, б), типичная, например, для композиционного TiC-Ni покрытия на медном сплаве [10]. Одиночные трещины присутствуют, в основном, на участках затвердевшей жидкой фазы и на их границах (см. рис. 2, в, г). Известно [11, 12], что трещины в ЭИЛ-покрытиях являются результатом остаточных термических напряжений растяжения, появляющихся в процессе охлаждения жидкой фазы. Отсутствие регулярной сетки трещин на поверхности покрытий даже при времени легирования  $t = 7$  мин может быть обусловлено несколькими причинами, главная из которых – близость коэффициентов термического расширения основных компонентов материала покрытия:  $ZrB_2$  ( $5,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ );  $LaB_6$  ( $6,4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ );  $SiC$  ( $4,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ). Кроме того, сравнительно небольшая теплопроводность ( $\lambda$ ) титанового сплава  $\lambda_{Ti} = 21,9$  Вт/(м·К) по сравнению со сталями  $\lambda_{Fe} = 74,0$  Вт/(м·К), алюминиевыми  $\lambda_{Al} = 221,5$  Вт/(м·К) и медными сплавами  $\lambda_{Cu} = 401,2$  Вт/(м·К) снижает скорость кристаллизации жидкой фазы в процессе формирования покрытия. Принимая во внимание, что Ti и Zr являются изоэлектронными и изоструктурными элементами, можно ожидать прочной связи между покрытием и подложкой.

На рис. 4 представлены кривые износа (1-9) ЭИЛ-покрытий на сплаве BT20 от пути ( $L$ ) и времени износа ( $\tau$ ) в зависимости от разных материалов электрода и способа нанесения покрытий. Для сравнения такие же зависимости получены для титанового сплава BT20 без покрытия (образец 1) и для ЭИЛ-покрытия WC+3 % Co (образец 2). Выбор электродного материала ВК-3 обусловлен самой высокой абразивной износостойкостью низкокобальтового сплава в ряду твёрдых сплавов WC-Co [13]. Получен-

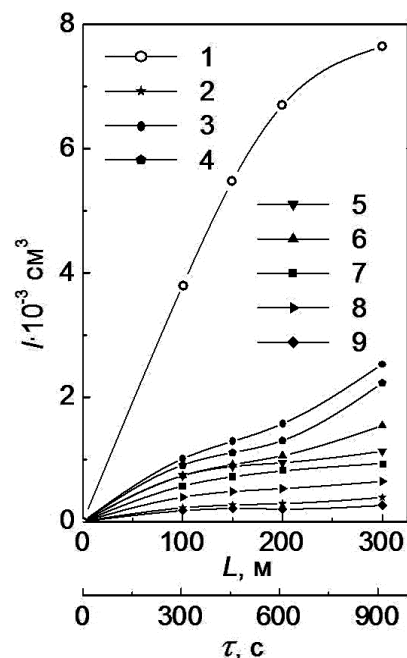


Рис. 4. Кинетические зависимости абразивного изнашивания покрытий ( $P = 44,1$  Н;  $t = 7$  мин/см<sup>2</sup>). Номера образцов соответствуют табл. 1

ные трёхстадийные кинетические зависимости ( $L$ ,  $\tau$ ) являются типичными для трения скольжения [14] и отражают изменения состояния полиоксидной трибоплёнки в контактной зоне “абразивная частица–поверхность покрытия” в процессе абразивного изнашивания.

Первая стадия кинетики износа ( $L \leq 100$  м) представляет режим начального износа (“приработки”), соответствующий формированию трибоплёнки. На этой стадии скорость износа поверхности, определяемая как  $\text{tg } \alpha = I/L(\tau)$ , наибольшая для непокрытого сплава ВТ20 (см. рис. 4, образец 1) и снижается для ЭИЛ-покрытий в ряду ЦБСАН→ЦЛАБ-3→ЦЛАБ-2 по мере увеличения объёмного содержания  $ZrB_2$  в материале легирующего электрода (см. табл. 2) и, соответственно, в составе покрытия. Значение  $L$ , соответствующее переходу “начальный износ→ нормальный износ”, для исходного сплава ВТ20 без покрытия (~200 м) вдвое больше, чем для покрытий (~100 м). Это указывает на то, что на поверхности покрытия трибоплёнка формируется на более раннем этапе износа.

На II стадии процесса ( $100 \text{ м} \leq L \leq 200 - 300$  м, режим “нормального” износа) скорость изнашивания покрытий резко уменьшается (см. табл. 2), что отвечает стабильной фазе сформированной трибоплёнки. Сохраняется тот же ряд уменьшения как скорости, так и величины износа по мере увеличения объёмного содержания  $ZrB_2$  в материале электрода (см. рис. 4, табл. 2). В том же направлении возрастает длительность второй стадии.

Таблица 2

Параметры изнашивания покрытий на сплаве ВТ20, номера образцов соответствуют табл. 1 (9' – на сплаве ВТ1-0)

| Образец | Содержание $ZrB_2$ (об.%) в аноде | Скорость изнашивания $\times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /мин на пути $L$ , м |           |           | Абразивный износ $I \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> |              |
|---------|-----------------------------------|--|-----------|-----------|---|--------------|
|         |                                   | до 100 м   | 100-200 м | 200-300 м | $P = 44,1$ Н  | $P = 84,2$ Н |
| 3       | 31,28                             | 0,198  | 0,1100    | 0,189     | 0,55  | 1,03         |
| 6       | 60,87                             | 0,145  | 0,0633    | 0,0949    | 0,40  | 0,30         |
| 5       | 60,87                             | 0,145  | 0,0407    | 0,0361    | 0,40  | 0,14         |
| 7       | 76,67                             | 0,112  | 0,0477    | 0,0239    | 0,32  | 0,54         |
| 8       | 60,87                             | 0,0771   | 0,0272    | 0,0227    | 0,22  | 0,023        |
| 9'      | 76,67                             | 0,0341   | 0,0068    | 0,0102    | 0,10  |              |
| 2       |                                   | 0,0433   | 0,0131    | 0,0197    | 0,13  | 0,12         |

III стадия процесса ( $L \geq 200 - 300$  м, “интенсивный износ”) характеризуется резким увеличением интенсивности изнашивания ЭИЛ-покрытий ЦБСАН, ТХБФ и ЦЛАБ-3 в результате удаления трибоплёнки и абразивного износа покрытий. При этом как величина, так и скорость износа уменьшаются в ряду покрытий: ЦБСАН→ЦЛАБ-3→ЦЛАБ-2 (см. рис. 2, табл. 2), как это имело место на I и II стадиях.

Как видно (см. рис. 5), наибольшую износостойкость покрытий обеспечивает электродный материал ЦЛАБ-2 [15]. При сравнении такая же концентрационная зависимость величины износа обнаружена у ранее исследованных покрытий на алюминиевом сплаве АЛ25 [16], интенсивность изнашивания уменьшается, соответственно, в 3 – 4 и 5 – 7 раз (см. рис. 5).

Кроме положительного влияния  $ZrB_2$ , уменьшению величины износа способствуют увеличение времени ЭИЛ (см. рис. 4, образцы 5, 6) и повышение толщины покрытия. Однако в значительно большей степени интенсивность изнашивания уменьшается после ЛО покрытия (см. рис. 4, № 5, 7-9), до ~75 %.

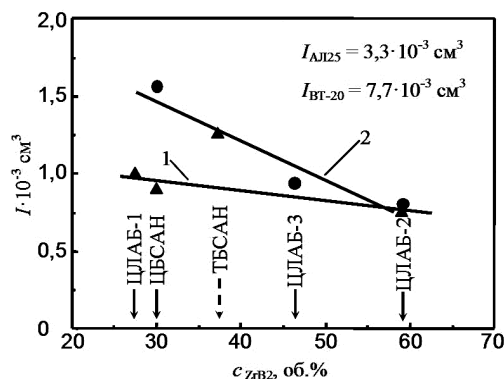
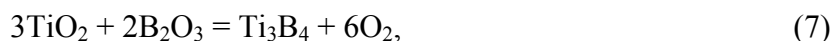
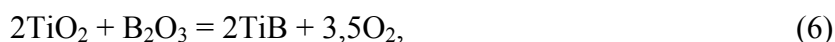
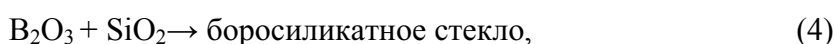
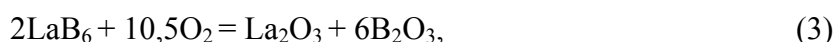
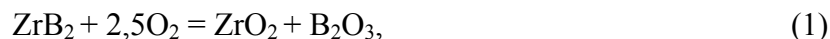


Рис. 5. Зависимость абразивного износа ЭИЛ-покрытий на сплавах АЛ25 [5] (1) и ВТ20 (2) от содержания  $ZrB_2$  в электродных материалах ( $L = 200$  м,  $P = 44,1$  Н)

Влияние нагрузки на интенсивность изнашивания покрытия неоднозначна (см. табл. 2). С ростом  $P$  абразивный износ покрытий ЦЛАБ-2 и ЦБСАН увеличивается, но он уменьшается для всех покрытий, полученных с использованием электрода ЦЛАБ-3, содержащего карбид кремния. Наибольшее уменьшение изнашивания с ростом нагрузки наблюдается для комбинированного покрытия ЦЛАБ-3. Его износостойкость в 5 раз выше, чем износостойкость ЭИЛ-покрытия WC+3 % Co при  $P = 84,2$  Н (см. табл. 2).

Трёхстадийная кинетика процесса изнашивания (см. рис. 4) и окисление поверхности износа покрытий [17] свидетельствуют о формировании износозащитной плёнки в контактной зоне “абразивная частица–поверхность покрытия” в процессе скольжения абразивных частиц по поверхности. Наиболее вероятными компонентами трибоплёнки являются продукты окисления легирующих компонентов на поверхности износа, на которой могут протекать следующие реакции окисления и фазообразования:



Образование оксидных фаз подтверждается дифрактограммой, снятой с изношенных поверхностей покрытий [17].

Формирование износозащитных плёнок в контактной зоне “абразивная частица–поверхность покрытия” позволяет объяснить аномальное увеличение износостойкости с ростом нагрузки ЭИЛ-покрытий ЦЛАБ-3, содержащих карбид кремния (см. табл. 2). Причиной этого, согласно реакции (4), может быть образование в контактной зоне вязкого легкоплавкого боросиликатного стекла на основе  $B_2O_3$ , улучшающего свойства вторичной плёнки.

Износостойкость комбинированного покрытия возрастает в 4 раза за счёт уменьшения потерь на хрупкое разрушение из-за увеличения твёрдости изношенной поверхности до 22 – 38 ГПа [17].

Известно, что в случае нежёстко закреплённого абразива интенсивность абразивного изнашивания ( $I$ ) двухкомпонентных композиционных материалов системы “твёрдая фаза–металлическая связка” зависит от среднего размера зерна ( $d$ ) и объёмного содержания твёрдой фазы ( $W$ ). Эта зависимость выражается формулой [18]

$$I = K \cdot d^{1/2} / W, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий структурные дефекты поверхности покрытия.

В нашем случае композиционной керамики с участием нескольких твёрдых фаз, суммарное объёмное содержание твёрдых фаз ( $ZrB_2$ ,  $LaB_2$ ,  $SiC$ ) в материале электрода (соответственно, и в составе покрытия) увеличивается в ряду: ЦБСАН → ЦЛАБ-2 → ЦЛАБ-1 → ЦЛАБ-3 [17]. Микротвёрдость этих фаз имеет близкие величины в диапазоне 27 – 28 ГПа. Принимая во внимание одинаковый размер зерна в материале электрода (2 – 3 мкм), можно предположить, согласно формуле (10), что наибольшую износостойкость должно иметь покрытие из материала ЦЛАБ-3 с максимальным суммарным содержанием твёрдых фаз. Но реально, в соответствии с полученными результатами (см. рис. 4, 5), указанный выше ряд не совпадает с увеличением износостойкости покрытий. Износ уменьшается с увеличением объёмного содержания  $ZrB_2$  в материале электрода в ряду [17]: ЦЛАБ-1 → ЦБСАН → ЦЛАБ-3 → ЦЛАБ-2. Это приводит к выводу о том, что в случае композиционной керамики с несколькими твёрдофазными компонентами величина  $W$  в формуле (10) должна соответствовать объёмному содержанию ( $W'$ ) той твёрдой фазы, которая играет доминирующую роль в общем эффекте уменьшения износа. Тогда формула (10) приобретает вид:

$$I = K \cdot d^{1/2} / W'. \quad (11)$$

Может быть несколько причин положительного влияния  $ZrB_2$  на износостойкость покрытий. Одна из них связана с механической прочностью материала, определяющей сопротивление поверхности деформированию, которое возникает в результате силовых и температурных воздействий в процессе изнашивания. На примере системы  $V_4C-VB_2$  была показана прямая корреляция величины абразивного износа с контактной и микроструктурной прочностью керамики [19]. Модуль упругости ( $E$ ), являющийся одной из характеристик прочности материала, оказывается наибольшим у  $ZrB_2$  по сравнению с другими твёрдыми фазами легирующего композита:  $E_{ZrB_2} = 496$  ГПа;  $E_{\beta-SiC} = 432$  ГПа;  $E_{LaB_6} = 398$  ГПа. Для металлов и сплавов в условиях жёстко закреплённого абразива существует прямая пропорциональная зависимость между величиной  $E$  и стойкостью к абразивному изнашиванию [20, 21]. Возможно, эта зависимость сохраняется и в случае керамик, что подтверждается результатами работы [19]. Поэтому абразивный износ уменьшается с ростом содержания в покрытии диборида циркония, обладающего наибольшим модулем упругости. Другой причиной может быть увеличение в составе трибоплёнки (с ростом содержания  $ZrB_2$ ) доли сложных оксидов системы Ti-Zr-O, образующихся, по данным РФА [17], на изношенной поверхности ЭИЛ-покрытия по реакциям (1), (2), (5), (8). Согласно экспериментальным результатам работы [22], суммарный объёмный износ уменьшается с увеличением скорости спекания оксидных частиц в трибоплёнке, которая определяется скоростью диффузии кислорода в оксиде. В сложных оксидах системы Ti-Zr-O диффузия кислорода должна быть выше, чем в диоксидах  $TiO_2$  и  $ZrO_2$ , за счёт связи Ti-Zr, ослабляющих межатомное взаимодействие “металл–кислород”. С этих позиций увеличение доли сложных оксидов в составе трибоплёнки с ростом объёмного содержания  $ZrB_2$  в материале электрода должно способствовать повышению износостойкости покрытий, что и было подтверждено в результате исследований (см. рис. 4, 5). Кроме того, принимая во внимание возможность присутствия  $ZrO_2$  в составе трибоплёнки, согласно реакциям (1) и (2), можно предположить улучшение теплозащитных свойств поверхности покрытия с повышенным содержанием  $ZrB_2$  в составе керамического электрода.

Обращает внимание, что ЭИЛ-покрытия из материалов ТБСАН и ТХБФ на основе, соответственно,  $TiB_2$  и  $TiCrB_2$ , в 1,6 раза уступают по абразивной износостойкости  $ZrB_2$ -содержащим покрытиям (см. рис. 4, 5), несмотря на повышенное содержание в них боридной фазы (37,29 и 80,32 об. %, соответственно), более высокий модуль упругости  $TiB_2$  (~520 ГПа) и твёрдости (32 ГПа) по сравнению с  $ZrB_2$  (496 и 28 ГПа, соответственно). Причиной этого может быть образование плотных и сплошных слоёв  $ZrO_2$  в составе трибоплёнки  $ZrB_2$ -содержащих покрытий в отличие от рыхлых полиоксидных слоёв  $TiO_x$  ( $x \leq 2$ ) в  $TiB_2$ -содержащих покрытиях, снижающих уровень защитных свойств поверхности [23].

Окисление поверхности износа и трёхстадийный характер кинетики износа свидетельствуют о влиянии трения скольжения на абразивную износостойкость. Поэтому для композиционных керамик в формулу (11) можно ввести коэффициент  $r$ , учитывающий скорость формирования трибоплёнки:

$$I = K \cdot d^{1/2} / (r \cdot W) \quad (12)$$

Полученные результаты показывают перспективность разработанных новых керамических композитов на основе  $ZrB_2$ , обеспечивающих получение покрытий с повышенной износостойкостью по сравнению с  $TiB_2$ -содержащими покрытиями и с покрытиями из вольфрамовых твёрдых сплавов при повышенных нагрузочно-скоростных параметрах.

Лазерное оплавление ЭИЛ-покрытия осуществляли по схеме, приведенной на рис. 6.

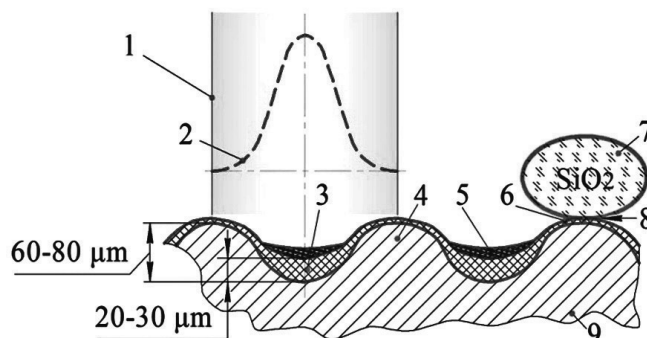


Рис. 6. Структурированная поверхность комбинированного покрытия ЦЛАБ-2 / ВТ1-0:

- 1 – луч лазера; 2 – распределение плотности мощности; 3 – оплавленное ЭИЛ-покрытие;
- 4 – межлазерная дорожка; 5 – измельчённые частицы  $SiO_2$ ; 6 – поверхность износа;
- 7 – абразивная частица; 8 – зона контакта; 9 – подложка (Ti сплав)

Нулевой коэффициент перекрытия дорожек и гауссовское распределение плотности мощности в пятне нагрева приводит к формированию структурированной поверхности в виде чередования лазерных дорожек оплавления (см. рис. 7).

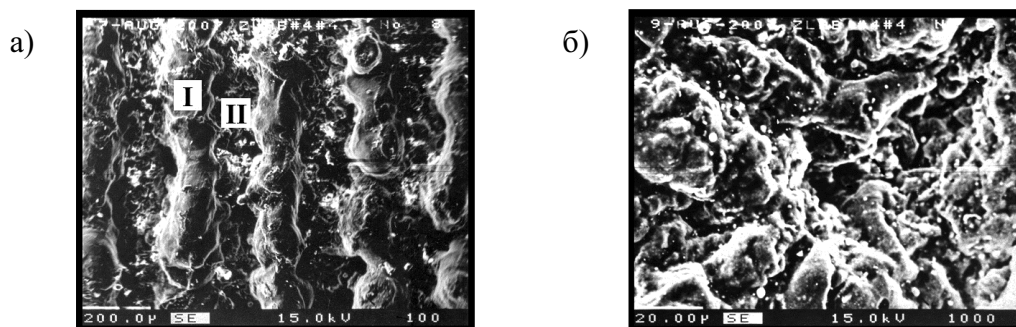


Рис. 7. Структурированная поверхность: а – комбинированного покрытия (ЦЛАБ-2)/(ВТ1-0):

- I – межлазерная дорожка оплавления, II – участок проплавленного ЭИЛ-покрытия;
- б – микроструктура участка ЭИЛ между лазерными дорожками

Между сглаженными оплавленными дорожками I находятся дорожки проплавленного ЭИЛ-покрытия II (на расстоянии ~100 мкм), подвергнутого нагреву в процессе ЛО. Микрорентгеноструктурный анализ показывает, что дорожки ЛО I представляют собой Ti-сплав, модифицированный La- и Zr-содержащими компонентами. Концентрационные минимумы Si и O обнаружены на участках I, сформированных в процессе кристаллизации Ti-сплава как ЭИЛ- (см. рис. 3), так и комбинированного “ЭИЛ+ЛО” покрытий (см. рис. 8).

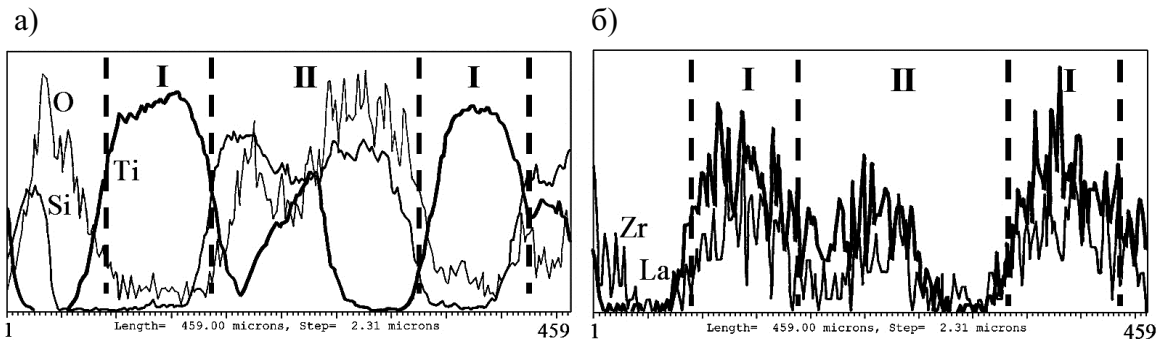


Рис. 8. Распределение элементов на исходной поверхности комбинированного “ЭИЛ+ЛО” покрытия (ЦЛАБ-2)/(ВТ1-0): а – Ti, Si, O; б – Zr, La; I – межлазерная дорожка; II – участок проплавленного ЭИЛ-покрытия

Это указывает на общий характер формирования состава зоны кристаллизации в обоих случаях, возможно, связанный с селективностью смачивания материалом подложки легирующих компонентов [24]. Как правило, смачиваемость металлами оксидов ниже, чем металлоподобных соединений, что может объяснить полученную закономерность.

Количество трещин на поверхности участков I оплавленного ЭИЛ-покрытия мало (см. рис. 7, а). Согласно работе [10], лазерный нагрев ЭИЛ-покрытия позволяет улучшить его качество за счёт интенсификации диффузионного массопереноса металла подложки. Уровень остаточных напряжений, развиваемых в покрытии, снижается в результате лазерной обработки, так как длительность охлаждения подложки и покрытия после лазерного нагрева значительно выше, чем в случае ЭИЛ, из-за большей плотности энергии.

Исследования износостойкости покрытия системы (ЦЛАБ-2)/(ВТ1-0) при воздействии нежёстко закреплённого кварцевого абразива на машине трения с нагрузкой 44,1 Н и путь трения 200 м показывают, что структурированная поверхность комбинированного (ЭИЛ+ЛО)-покрытия в виде чередующихся дорожек модифицированной Ti-матрицы и промежуточных участков ЭИЛ-покрытия, обогащённых кислородом, сохраняется (см. рис. 9).



Рис. 9. Распределение элементов на изношенной поверхности комбинированного покрытия (ЦЛАБ-2)/(ВТ1-0) во вторичных электронах (а) и в характеристическом излучении: б –  $TiK_{\alpha}$ ; в –  $OK_{\alpha}$  (стрелки указывают на дефекты износа)

Отдельные поперечные трещины наблюдаются преимущественно внутри лазерных дорожек (см. рис. 10, а). Слабая травимость зоны лазерного воздействия может свидетельствовать об измельчении зёрненной структуры (см. рис. 10, б, в). Поверхность межлазерных дорожек, выступающих над уровнем ЭИЛ-покрытия на ~50 – 80 мкм, является рабочей поверхностью износа комбинированного покрытия.

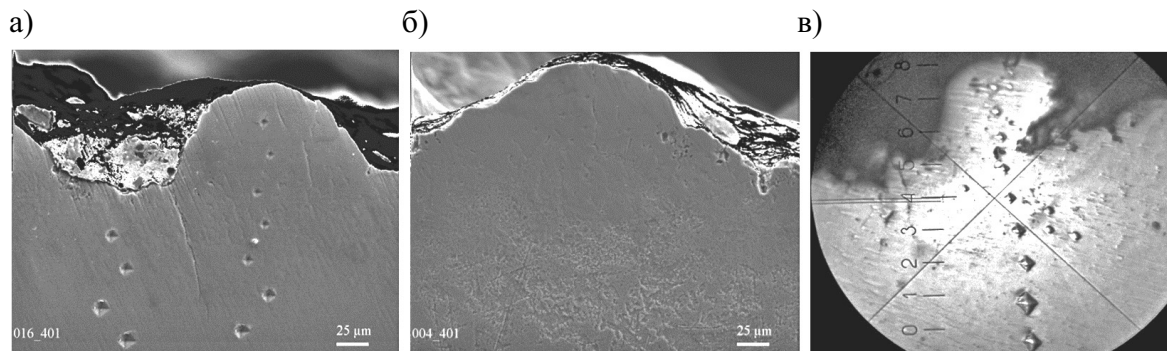


Рис. 10. Микроструктура поперечного сечения комбинированного (ЭИЛ+ЛО<sub>Ag</sub>)-покрытия (ЦЛАБ-2)/(VT1-0) после абразивного воздействия (а, б, в – разные лазерные дорожки)

Характер микроструктуры изношенной поверхности ЭИЛ-покрытия и комбинированного (ЭИЛ+ЛО)-покрытия показан на рис. 11.

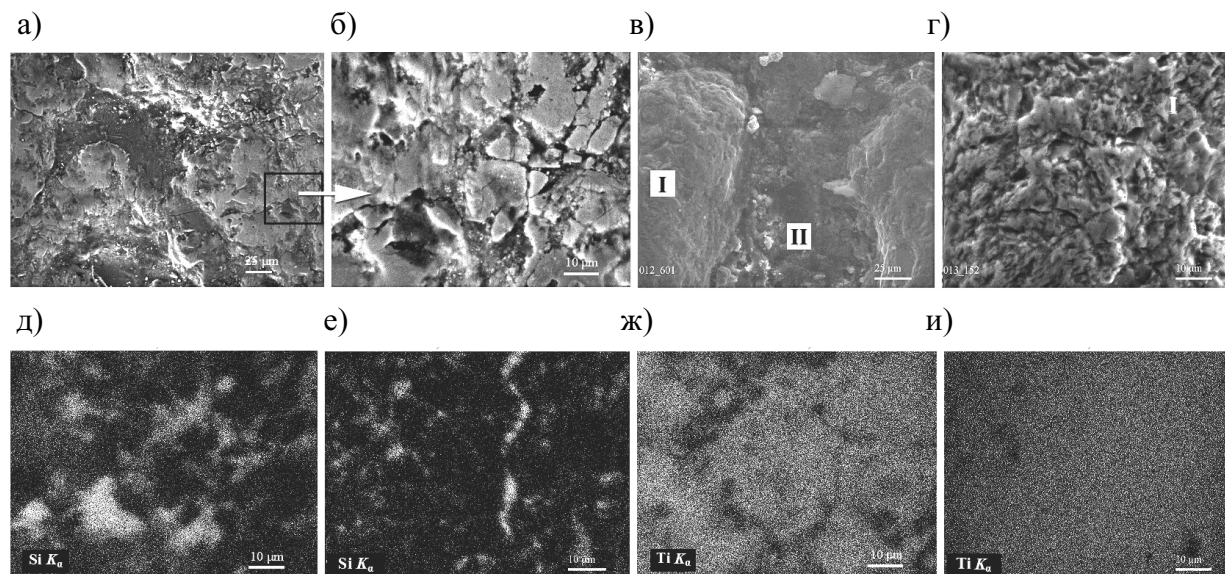


Рис. 11. Микроструктура изношенной поверхности покрытий (ЦЛАБ-2)/(VT-20): ЭИЛ-покрытие (а, б) и комбинированное (ЭИЛ+ЛО) (в, г) во вторичных электронах и в характеристическом излучении  $SiK_{\alpha}$  (д, е) и  $TiK_{\alpha}$  (ж, и);  
 I – изношенная поверхность межлазерной дорожки;  
 II – оплавленное ЭИЛ-покрытие

Как видно, микроструктура существенно различается, что указывает на смену ведущего механизма изнашивания с хрупкого разрушения материала для ЭИЛ-покрытия на локальный съём материала (оксиды, титан и др.) – для комбинированного покрытия. Глубокие трещины на изношенной поверхности ЭИЛ-покрытия являются результатом его хрупкого разрушения абразивными частицами.

Изношенная поверхность комбинированного покрытия (см. рис. 11, в, г) сформирована в результате локализации съёма материала с образованием следов износа в виде вырывов

и канавок. В этом случае более равномерное и слабее выраженное распределение Si и, соответственно, более равномерное распределение титана (см. рис. 11, *e, и*) указывают на меньшую глубину дефектов износа по сравнению с ЭИЛ-покрытием (см. рис. 11, *д, ж*). Неоднородное распределение Si (см. рис. 11, *д*) свидетельствует о том, что он заполняет в основном структурные дефекты износа.

Обнаружены повышенные (в 2 – 4 раза на глубине до 50 мкм) значения изменения твёрдости на участках поверхности износа межлазерной дорожки комбинированного покрытия по сравнению с твёрдостью как оплавленного ЭИЛ-покрытия, так и поверхности межлазерной дорожки до абразивного воздействия (см. рис. 12).

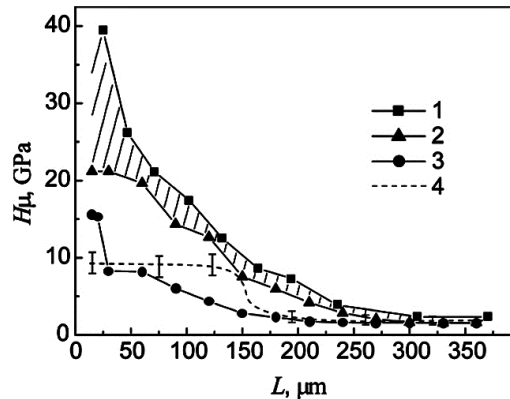


Рис. 12. Изменение микротвёрдости по глубине комбинированного покрытия (ЦЛАБ-2)/ (ВТ1-0):  
 1, 2 – межлазерные дорожки после абразивного воздействия;  
 3 – участок оплавленного ЭИЛ-покрытия между лазерными дорожками;  
 4 – межлазерная дорожка до абразивного воздействия

Микротвёрдость тонкого наружного слоя поверхности износа межлазерной дорожки толщиной  $\leq 30$  мкм колеблется для разных дорожек в интервале  $(22 - 38) \pm 0,4$  ГПа, уменьшаясь плавно по глубине до значения  $\sim 2,5$  ГПа в основе, и в 2 – 4 раза выше микротвёрдости исходной поверхности межлазерной дорожки до абразивного воздействия ( $\sim 9,5$  ГПа). Разброс значений микротвёрдости изношенных дорожек (почти в 2 раза) может быть связан с нестационарностью процесса лазерного оплавления и неоднородностью структуры исходного ЭИЛ-покрытия, приводящих к островковому характеру межлазерных дорожек, неравномерной их высоте и, как следствие, к неравномерности абразивного воздействия на них.

Причина смены механизма износа (см. рис. 11) состоит в увеличении твёрдости изношенной поверхности комбинированного покрытия до 22 – 38 ГПа. Вследствие этого глубина внедрения абразивных частиц меньше, чем на поверхности оплавленного ЭИЛ-покрытия. Поэтому сила трения, затрачиваемая на пластическое деформирование, уменьшается в случае комбинированного покрытия. Прирост твёрдости в тонком наружном слое изношенной поверхности комбинированного покрытия может быть связан с возможностью образования твёрдого раствора замещения  $(Zr, Ti)B_2$ , обладающего твёрдостью  $\sim 42-43$  ГПа [12], что подтверждается данными рентгенофазового анализа (см. рис. 13). Кроме того, имеющиеся в литературе сведения [12, 25, 26] дают прямые экспериментальные доказательства взаимосвязи прироста твёрдости покрытия с возникновением наноструктурированного состояния. Это позволяет предположить, что и в процессе абразивного изнашивания нежёстко закреплённым абразивом комбинированного покрытия на изношенной поверхности возможно образование наноструктурированного слоя, объясняющего увеличение твёрдости поверхности износа в 2 – 4 раза по сравнению с исходной поверхностью до абразивного воздействия.

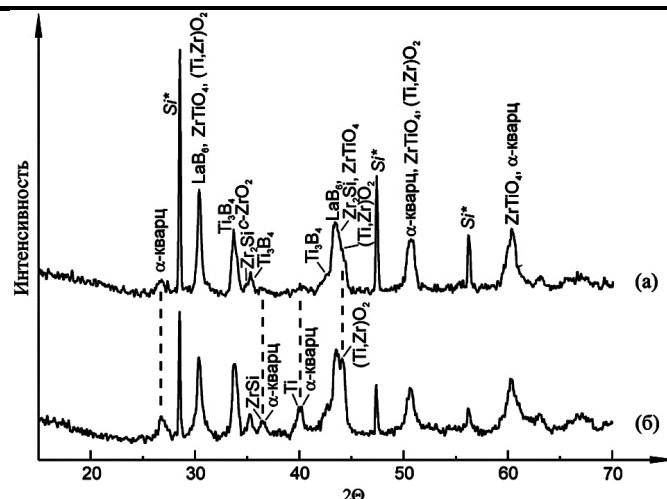


Рис. 13. Рентгеновские спектры поверхности ЭИЛ-покрытия (ЦЛАБ-2)/(VT1-0) до (а) и после (б) абразивного изнашивания

Дифрактограммы поверхностей ЭИЛ- и комбинированных покрытий до и после износа (рис. 13) указывают на фазовые превращения и окисление поверхности в зоне трибоконтакта “абразивная частица–поверхность покрытия” в процессе абразивного воздействия. Смещение линий диборида циркония на дифрактограммах вызвано образованием твёрдого раствора замещения  $(Zr,Ti)B_2$  в системе Ti-Zr-B, в которой существует область ограниченной растворимости [27, 28]. Обращает внимание, что на рентгенограммах, полученных с поверхностей трения покрытий (см. рис. 13, а, б), наряду с тетрагональной фазой  $ZrO_2$  в небольшом количестве зафиксирована кубическая фаза  $ZrO_2$ , появление которой, очевидно, связано с переходом части тетрагональной фазы в кубическую по диффузионному механизму. Присутствие  $\alpha-SiO_2$  на поверхностях трения обусловлено, вероятно, заполнением поверхностных дефектов измельчёнными абразивными частицами кварца, что подтверждается распределением Si на изношенных поверхностях (см. рис. 11, д, е).

В равновесных условиях окисление боридов и силицидов циркония протекает при температурах  $T \leq 750$  °C и  $T \geq 750$  °C, соответственно. Образование сложных оксидов титана-циркония свидетельствует о том, что в крайне неравновесных условиях процессов изнашивания нежёстко закреплённым абразивом и ЭИЛ окисление происходит при значительно меньших температурах.

### Выводы

1. Показаны закономерности абразивного изнашивания нежёстко закреплённым абразивом комбинированного “ЭИЛ+ЛО”-покрытия на Ti-сплавах, полученного с использованием керамических электродных материалов с разным содержанием  $ZrB_2$ , а также влияние на износостойкость модуля упругости легирующих компонентов и состава трибоплёнки в зоне контакта “абразивная частица”–поверхность “ЭИЛ+ЛО”-покрытия.

2. Повышению абразивной износостойкости  $ZrB_2$ -содержащих комбинированных “ЭИЛ-ЛО”-покрытий на Ti-сплавах способствуют: увеличение в легирующем электроде содержания  $ZrB_2$ , обладающего наибольшим модулем упругости среди твёрдых фаз композита. При этом ЛО способствует приросту твёрдости в наружном слое поверхности износа после абразивного воздействия, а увеличение времени нанесения ЭИЛ-покрытия повышает его толщину.

3. Предложено уточнённое уравнение абразивного износа нежёстко закреплённым абразивом композиционных керамических покрытий с количеством твёрдых фаз  $\geq 2$ , учитывающее скорость формирования трибоплёнки и объёмное содержание той твёрдой фазы в составе покрытия, которая оказывает доминирующее влияние на износ.



4. Износостойкость комбинированного “ЭИЛ+ЛО”-покрытия, полученного с использованием SiC-содержащего электрода, в 5 раз выше износостойкости ЭИЛ-покрытия WC+3 % Co при повышенной нагрузке (84,2 Н).

5. Показаны структурно-фазовые превращения на поверхности комбинированного “ЭИЛ+ЛО”-покрытия, полученного ZrV<sub>2</sub>-содержащими электродами на Ti-сплавах.

6. Установлено, что участки поверхности как исходного ЭИЛ-покрытия, так и комбинированного “ЭИЛ+ЛО”, образующиеся в результате оплавления при тепловом воздействии концентрированного потока энергии (искрового разряда или лазерного излучения), представляют собой Ti-сплав подложки, модифицированный легирующими компонентами и обеднённый оксидными фазами.

7. Лазерное оплавление ЭИЛ-покрытия на Ti-сплавах приводит к формированию структурированной поверхности в виде чередования лазерных дорожек модифицированного Ti-сплава и участков неоплавленного ЭИЛ-покрытия. Поверхность лазерных дорожек оплавления, выступающих над уровнем ЭИЛ-покрытия на ~50 – 80 мкм, является поверхностью износа комбинированного покрытия.

8. Обнаружен прирост твёрдости (до 22 – 38 ГПа) в локальных участках поверхностного слоя изношенной межлазерной дорожки ЛО, в 2 – 4 раза превышающей твёрдость поверхности до абразивного воздействия (~9,5 ГПа).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев, Ю. П. *Материаловедение* / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2004. – 736 с.
2. Носовский, И. Г. *Влияние газовой среды на износ металлов* / И. Г. Носовский. – Киев: Техника, 1968. – 181 с.
3. *Трение и износ покрытий, полученных электроискровым легированием поверхности сплава титана переходными металлами* / И. Г. Ткаченко, В. В. Михайлов, А. Е. Гитлевич [и др.] // *Электронная обработка материалов*. – 1976. – № 2. – С. 28-31.
4. *Материаловедение: учеб. для высших технических заведений* / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
5. Николаев, Г. И. *Металл века* / Г. И. Николаев. – М.: Металлургия, 1987. – 168 с.
6. *Электроискровое легирование металлических поверхностей* / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский [и др.]; под ред. Ю. Н. Петрова. – Кишинёв: Изд-во Штиинца, 1985. – 196 с.
7. *Влияние электроискрового легирования поверхности титана на его жаростойкость* / В. В. Михайлов, А. Е. Гитлевич, М. М. Маркус [и др.] // *Электронная обработка материалов*. – 1974. – № 5. – С. 23-25.
8. *Коррозионное и электрохимическое поведение титана с покрытиями, полученными методом электроискрового легирования в растворах NaCl, насыщенных хлором* / И. В. Рискин, А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов [и др.] // *Электронная обработка материалов*. – 1978. – № 6. – С. 25-28.
9. *Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости* / Б.А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мироненко [и др.]. – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.
10. Chen Z., Zhou Y. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization // *Surface and Coatings Technology*. 2006. 201, № 3-4. P. 1503-1510.
11. Galinov I.V., Luban R.B. Mass transfer trends during electrospark alloying // *Surface and Coatings Technology*. 1996. 79, No 1-3. P. 9-18.
12. Parkansky N., Boxman R.L., Goldsmith S. Development and application of pulsed-air-arc deposition // *Surface and Coatings Technology*. 1993. 61, No 1-3. P. 268-273.
13. Gant A.J., Gee M.E. Wear of tungsten carbide-cobalt hard metals and hot isostatically pressed high speed steels under dry abrasive conditions // *Wear*. 2001. 251, No 1-12. P. 908-915.
14. Беркович, И. И. *Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учеб. для вузов* / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.

15. Панасюк А.Д., Григорьев О.М., Подчерняева И.О. Та ін. Керамічний антифрикційний матеріал на основі дибориду цирконію. Патент України (UA) № 60724A. 15.10.2003. Бюл. № 10.
16. Подчерняева, И. А. Структурообразование и массоперенос износостойких покрытий при электроискровом легировании Al-Si-сплавов композиционной керамикой системы  $LaB_6-ZrB_2$  / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, Затуловский С.С. [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 6. – С. 50-59.
17. Закономерности абразивного изнашивания  $ZrB_2$ -содержащих электроискровых и комбинированных покрытий на титановом сплаве. I. Микроструктура и состав поверхности  $ZrB_2$ -содержащих покрытий / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. М. Панашенко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2009. – № 5/6. – С. 88-89.
18. Ji G.C., Li C.J., Wang Y.Y., Li W.Y. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed  $Cr_3C_2-NiCr$  coating // Surface and Coatings Technology. 2006. 200, No 24. P. 6749-6757.
19. Стойкость композитов  $B_4C-VB_2$  при абразивном изнашивании и трении в паре со сталью / О. Н. Григорьев, Б. А. Галанов, В. А. Котенко [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 10. – С. 2-8.
20. Хрущов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 350 с.
21. Хрущов, М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
22. Kato H., Komai K. Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces // Wear. 2007. 262, No 1-2. P. 36-41.
23. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – М.: Иностранная литература, 1955. – 311 с.
24. Поверхностное модифицирование сплава АЛ9 при электроискровом легировании материалами системы  $AlN-Ti(Zr)B_2-Ti(Zr)Si_2$  / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, Д. В. Юречко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2004. – № 3/4. – С. 54-62.
25. Шулаев, В. М. Об эффекте прироста твердости в покрытиях нитрида молибдена / В. М. Шулаев, А. А. Андреев, Г. Н. Картмазов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (15): науч.-техн. сб. – Харьков. – 2006. – № 1. – С. 195-198.
26. Wang Z.B., Tao N.R., Li S., Wang W. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel // Materials Science and Engineering A. 2003. 352, No 1-2. P. 144-149.
27. Eckert T.E. Ternary Phase Equilibria in Transition Metal-Boron-Carbon-Silicon Systems. Ohio, USA: Wright-Patterson, Air Force Materials Laboratory: Rep. AFML-TR-65-2, Contract USAF 33(615)-1249. 1966. Part II. Ternary Systems. Volume XII. Ti-Zr-B System. Investigation of Pseudobinary Systems  $ZrB_2-NbB_2$ ,  $ZrB_2-TaB_2$ , and  $HfB_2-NbB_2$ . P. 1-47.
28. Otani S., Aizawa T., Kieda N. Solid solution ranges of zirconium diboride with other refractory diborides:  $HfB_2$ ,  $TiB_2$ ,  $TaB_2$ ,  $NbB_2$ ,  $VB_2$ ,  $CrB_2$  // Proc. ISBB2008: 16th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials (Matsue, September 7-12, 2008). Matsue, 2008. P. 91.

**Тютин Е. А., Шпилёва А. А., Яковлева К. П.**  
**E. A. Tyutina, A. A. Shpileva, K. Yakovleva**

### **СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **MODERN VIEWS OF USING MULTIFUNCTIONAL NANOSTRUCTURED COATINGS IN INDUSTRY**



**Тютин Елена Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: etyutina@mail.ru.

**Ms. Yelena A. Tyutina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: etyutina@mail.ru



**Шпилёва Анна Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: shpilanna@mail.ru.

**Ms. Anna A. Shpileva** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: shpilanna@mail.ru



**Яковлева Ксения Петровна** – студентка группы 7ММм кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ksusha-and-vanya@mail.ru.

**Ms. Kseniya P. Yakovleva** – undergraduate student, Group 7ММм, Department of Materials and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: ksusha-and-vanya@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные направления использования наноструктурированных покрытий.

**Summary.** The paper considers the key areas of application of nanostructured coatings.

**Ключевые слова:** многофункциональные покрытия, наноструктурированные материалы, улучшение характеристик, нанопорошки, машиностроение.

**Key words:** multi-functioning coatings, nanostructured materials, properties improvement, nanopowders, mechanical engineering.

УДК 621.001.12/18

Разработка и получение наноматериалов и нанокомпозитов с заданными физико-химическими свойствами является центральной проблемой современной науки и техники. Особое внимание исследователей привлекают многофункциональные покрытия.

Многофункциональные наноструктурированные покрытия – это термобарьерные, износостойкие, коррозионностойкие, ультрагидрофобные, огнеупорные, антифрикционные, антипригарные и другие покрытия. В сравнении с обычно структурированными покрытиями они отличаются улучшенными качествами и обладают высокой твердостью, вязкостью, термостойкостью, низким коэффициентом трения и т. д. Такой комплекс свойств обеспечивается за счёт особой нанокомпозитной структуры, представляющей собой нанокристаллитные керамические зёрна, распределённые в аморфной или кристаллической матрице.

Наноструктурированные покрытия используются для продления времени использования оборудования в машиностроительной, авиационной, атомной, нефтегазовой и других отраслях промышленности.

В нефтяной и газовой отраслях покрытия защищают от коррозии буровые платформы, мосты и металлоконструкции, а также защищают от износа запорную и насосно-компрессорную арматуру бурового, нефтегазодобывающего и перерабатывающего оборудования.

В настоящее время основным потребителем объёмных наноструктурированных материалов (стали, титана и его сплавов, алюминиевых сплавов, керамики, пластмассы и композиционных материалов) является машиностроительная отрасль. Актуальными также являются изделия из материалов с памятью, порошковых материалов, комплекующих наноизделий, применяющиеся в гидро- и электрооборудовании, нанопродукции приборостроения и т. д.

Наиболее перспективными являются такие процессы, как нанесение износостойких покрытий на режущие инструменты, штампы и пресс-формы, а также нанесение коррозионностойких, жаростойких, жаропрочных, эмиссионных и водоотталкивающих покрытий на детали машин и механизмов в самолёто- и вертолётостроении, металлургии, станкостроении, сварочном, литейном производстве и т. д. [1].

#### **Огнеупорные покрытия**

Во всём мире интенсифицируются действия по созданию, развитию, обновлению традиционных и нетрадиционных процессов производства новых огнеупорных материалов, в том числе и с использованием наноматериалов. Огнеупорная промышленность на современном этапе развивается в направлении повышения качества огнеупоров, улучшения их эксплуатационных характеристик и срока службы. Одним из актуальных направлений при этом является применение наночастиц углерода для заполнения микропор в составе огнеупора. Материалы, нанесённые на огнеупор, существенно улучшают характеристики поверхности: повышается твердость, пористость уменьшается в 1,3 – 1,8 раза, механическая прочность увеличивается в 2 – 3 раза, механический износ снижается в 2,0 – 2,5 раза.

Огнеупорные вязущие материалы предназначены для создания огнестойких и термостойких покрытий, обмазок, неорганических связок стеклообразных, керамических и металлических материалов и изделий. Ещё одним представителем новых материалов является композит на основе металлофосфатных и алюминатных вязущих материалов, содержащих углеродные нанотрубки. Композиты имеют высокую огнеупорность и термостойкость, обеспечивают высокие когезионные и адгезионные свойства затвердевшего материала (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики композитов на основе  
металлофосфатных и алюминатных вязущих материалов

| Параметры                            | Характеристики |
|--------------------------------------|----------------|
| Прочность через 3 сут                | 50 – 70 МПа    |
| Огнеупорность                        | 1700 – 1800 °С |
| Температура деформации под нагрузкой | 1500 – 1600 °С |
| Термостойкость, количество теплосмен | 40 – 50        |

Кроме этого, ЗАО НПКФ «MaBP»<sup>TM</sup> [2] был предложен эффективный комплексный подход к решению задач защиты футеровок тепловых и плавильных агрегатов из серийно



выпускаемых дешёвых огнеупорных изделий (полукислых; шамотных; диасовых; муллитокремнеземных, в том числе и легковесных) благодаря усовершенствованию конструкции кладки и применению самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), кладочных растворов, покрытий, обмазок и ремонтно-восстановительных смесей. Испытания показали, что, усовершенствовав технологию нанесения СВС-покрытий на рабочую поверхность шамотных изделий, срок их эксплуатации увеличился в 2 – 3 раза, независимо от их назначения. В отдельных случаях и при применении всего комплекса мероприятий ресурс работы ковшей, желобов и других агрегатов увеличивался до 15 раз.

Данная методика успешно опробована более чем на 15 металлургических и машиностроительных предприятиях России.

### **Износостойкие покрытия**

Наноструктурированные покрытия повышают износостойкость инструмента. Это позволяет проводить обработку металлов на более высоких скоростях и продлевает срок эксплуатации инструмента. Такое изменение характеристик (твёрдости, вязкости) инструмента с нанопокрытиями приводит к увеличению производительности труда и удешевлению изготавливаемой продукции. Использование наноструктурированных покрытий позволяет перерабатывать и повторно использовать инструмент до 12 раз. При этом, по сравнению с использованием инструмента без покрытия, происходит увеличение объёма снимаемого металла в 2 – 2,5 раза, а также возрастает стойкость между переточками и скорость резания в 1,5 – 2 раза. Промышленное производство монокристаллического твердосплавного металлорежущего инструмента с многослойным наноструктурированным покрытием предназначено для производства деталей на авиационных, машиностроительных, энергетических, автомобильных, судостроительных предприятиях.

### **Антифрикционные покрытия**

В настоящее время разрабатываются нанокompозитные износостойкие минеральные покрытия с заданными свойствами (антифрикционными, износостойкими, противозадирными). Технология формирования нанокompозитных минеральных покрытий – это принципиально новый продукт на рынке износостойких покрытий.

Целью работ по нанесению покрытий является обеспечение заданных свойств покрытий, а именно: минимизирование адгезии между двумя трущимися поверхностями и исключение массопереноса (налипания) одной поверхности на другую при рабочих давлениях. Сущностью выполняемых работ является использование природных минералов и формирование покрытий в виде нанослоёв с заданными свойствами на деталях пар трения при помощи специальных технологий.

Формирование комбинированных наноструктурных покрытий заключается во внедрении минеральных наночастиц (до 100 нм) в металлы. При совместном использовании нанопорошков и воздействии ультразвукового или другого инструмента формируются структуры поверхности, имеющие упорядоченные по составу и размерности свойства, за счёт чего достигается необходимое улучшение механических характеристик материала с нанесённым на него нанокompозитным покрытием. При этом замечено, что, наряду с формированием покрытий с заданными триботехническими свойствами, в значительной мере идёт и формирование коррозионной стойкости [3].

Предлагаемые на сегодняшний день комплексные технологии формирования многофункциональных поверхностей для пар трения механических систем в производстве новых изделий и при ремонтно-восстановительных работах позволяют не только осуществлять защиту от изнашивания деталей в эксплуатируемых механических системах, но и повышать их рабочий ресурс, снижать энергопотребление за счёт устранения механических потерь.

### **Термобарьерные покрытия**

Термобарьерные покрытия (ТБП) – это покрытия, применяемые для изолирования, в частности, частей газотурбинных двигателей, работающих при повышенных температурах.

ТБП характеризуются очень низкой теплопроводностью ( $\geq 2,5$  Вт/(м·К)) и высокой температурой плавления.

На сегодняшний день количество материалов, которые могут использоваться как термобарьерные, достаточно ограничено. Существующие технологии получения этих покрытий базируются в основном на одном материале теплового барьера – диоксиде циркония, стабилизированном иттрием (7YSZ). Основные показатели – это сопротивление тепловому удару и тепловой усталости до 1150 °С.

Выбор диоксида циркония, стабилизированного иттрием, является основным примером приоритета ресурса над рабочими характеристиками. Повышение содержания иттрия (Y) улучшает потенциал изолирования, при этом 7YSZ показывает максимальный циклический срок службы при испытаниях и за счет этого продолжает преобладать над новыми материалами. Также достаточно распространено для получения ТПБ высокоскоростное газопламенное напыление HVOF. Стандартная технология нанесения – алюминирование и предварительное нанесение на материал основы (как правило, суперсплав на базе никеля или кобальта) связующего покрытия MCrAlY. Промежуточный слой используется для компенсации остаточных напряжений, которые в противном случае могли бы развиваться в системе покрытий из-за различия коэффициентов теплового расширения металлической основы и керамического ТБП.

Было доказано, что покрытие 7YSZ является более стойким против коррозии  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$ , чем покрытие  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированное CaO или MgO. Главный недостаток 7YSZ – ограниченная рабочая температура при долговременном применении [4].

Типичными примерами применения термобарьерных покрытий являются лопатки турбин, камеры сгорания, системы трубопроводов и сопловые направляющие аппараты. ТБП сделали возможным увеличение рабочей температуры газовых турбин, и, как следствие, повысили их КПД.

На сегодня в рамках проектов ОАО «РОСНАНО» планируются и создаются сети инновационных производственных центров, которые должны работать над комплексными решениями по изготовлению и нанесению термобарьерных, износостойких, коррозионностойких, электроизоляционных, сверхпроводящих и других композиционных наноструктурированных покрытий для восстановления и продления сроков службы работы оборудования в авиастроении, машиностроении, металлургии, атомной и нефтегазовой промышленности. Тот факт, что в данные исследования вкладываются значительные государственные средства, свидетельствует об актуальности и перспективности этих исследований [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тютин, Е. А. Модифицирование полимер-силикатных материалов гранулированными нанопорошками / Е. А. Тютин, А. А. Шпилёва // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 51-56.
2. Использование для металлургических и литейных производств новых огнеупорных СВС-материалов и покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами / В. С. Владимиров [и др.] // Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии: материалы международной научно-практической конф. – М.: МИСиС, 2002. – С. 570-574.
3. Производственная компания "Покрашу.Ру" [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <http://www.pokrashu.ru/painting/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Технологические системы защитных покрытий [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.tspc.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Мухаметшин, Ф. М. Развитие наносферы в России и международное научно-техническое сотрудничество / Ф. М. Мухаметшин // Нанонаука и нанотехнологии. – 2009. – № 5. – С. 12-14.

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ  
FLEET AND SHIPBUILDING

**Журбина И. Н., Селиванов Е. И., Шадрин М. П.**  
**I. N. Zhurbina, E. I. Selivanov, M. P. Shadrin**

**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ОПЫТОВОГО БАСЕЙНА КНАГТУ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

**ENHANCING THE CAPABILITIES OF THE SHIP EXPERIMENTAL TANK  
AT KOMSOMOLSK-ON-AMUR TECHNICAL UNIVERSITY FOR MARINE  
ENGINEERING RESEARCH**

**Журбина Ирина Николаевна** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Zhurbina-irina@mail.ru.

**Ms. Irina N. Zhurbina** – PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Department of Shipbuilding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Zhurbina-irina@mail.ru

**Селиванов Евгений Игоревич** – аспирант кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Mr. Evgeny I. Selivanov** – PhD Candidate, Department of Shipbuilding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Шадрин Михаил Павлович** – аспирант кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ledokol\_3@mail.ru.

**Mr. Mikhail P. Shadrin** – PhD Candidate, Department of Shipbuilding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В статье показано развитие экспериментальной базы опытового бассейна КНАГТУ для исследования морской техники.

**Summary.** The paper shows the development of experimental capabilities of the ship experimental tank at Komsomolsk-on-Amur State Technical University for marine engineering research purposes.

**Ключевые слова:** опытовый бассейн, буксировочная тележка, гравитационная буксировочная система.

**Key words:** test tank, towing carriage, the gravitational towing system.

УДК 629.5.018.1

**Введение**

Опытовый бассейн Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета является уникальной гидродинамической лабораторией и предназначен для проведения различных исследований по оценке ходовых и мореходных качеств объектов морской техники. С момента начала работы опытового бассейна ведутся постоянные работы по развитию и модернизации его экспериментальной базы.

**Опытовый бассейн**

Бассейн представляет собой металлическую чашу с размерами  $L \times B \times H = 40 \times 4 \times 3$  м, установленную на бетонном основании (см. рис. 1). В передней части бассейна имеется доковая камера с размерами  $L \times B \times H = 4,5 \times 1,6 \times 3,0$  м. В дальней части бассейна установлен пластинчатый волнопродуктор (см. рис. 2) [2; 3; 6]. В опытовом бассейне КНАГТУ для проведе-

ния испытаний моделей судов используются две буксировочные системы. Первая система – это буксировочная тележка ферменного типа, которая перемещается по рельсам (см. рис. 3). Приводом этой буксировочной системы является тросовая электролебедка. Второй буксировочной системой является гравитационная буксировочная система (ГБС), кинематическая схема которой приведена на рис. 4 [2; 3].



Рис. 1. Чаша опытового бассейна КНАГТУ в осушенном состоянии



Рис. 2. Пластинчатый волнопродуктор и буксировочная тележка



Рис. 3. Заполненная водой чаша опытового бассейна КНАГТУ и буксировочная тележка

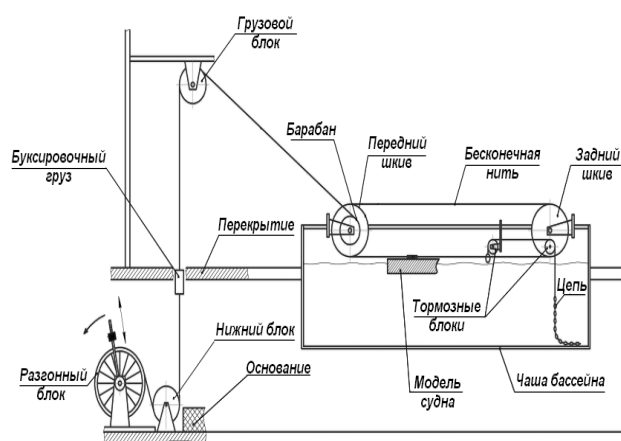


Рис. 4. Кинематическая схема гравитационной буксировочной системы опытового бассейна

### Модельный комплекс

В состав лаборатории опытового бассейна входит модельный комплекс, который состоит из модельной мастерской, двух фрезерных станков с ЧПУ и вычислительного комплекса для создания моделей судов и объектов океанотехники.

Модельная мастерская оборудована специализированной производственной мебелью (верстаки, инструментальные шкафы и др.), двумя стапельными столами и необходимыми инструментами для изготовления, сборки и подготовки моделей (см. рис. 5, 6). Тем самым созданы условия для работы студенческого конструкторского бюро и судомодельного кружка, где студенты и школьники могут заниматься судомодельным спортом и реализовывать свои проекты на новом технологическом уровне.

Все ведущие КБ и НИИ давно перешли на создание моделей при помощи фрезерных станков с ЧПУ, поскольку они обеспечивают высокую точность и высокое качество поверх-

ности, необходимые для получения наиболее точных результатов при испытаниях в опытном бассейне, а также значительно сокращают время и трудоемкость изготовления моделей.



Рис. 5. Помещение модельной мастерской



Рис. 6. Прецизионный стапельный стол для сборки и обмера моделей (размер 1000×3500 мм)

Для изготовления моделей с габаритной длиной до 1900 мм или составных моделей размером 2×1900 мм, 3×1900 мм в лаборатории опытового бассейна кафедры кораблестроения КНАГТУ используется станок SAHOS SPRINT FC1900CNC, способный обрабатывать дерево и пластики (см. рис. 7). Для изготовления «мелких» деталей моделей и устройств эксплуатируется фрезерно-гравировальный станок с ЧПУ Roland MDX-540 (см. рис. 8), установленный в отдельном помещении опытового бассейна. Он может обрабатывать пластики, дерево и цветные металлы. Также в комплекте станка есть поворотная ось ZCL-540, которая значительно расширяет возможности станка, позволяя производить полноценную четырехосевую обработку.

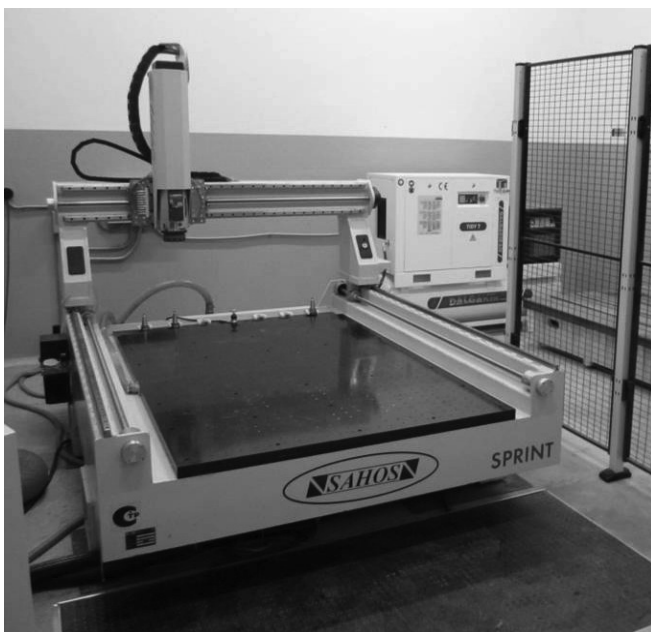


Рис. 7. Фрезерный станок с ЧПУ SPRINT FC1900CNC



Рис. 8. Фрезерно-гравировальный станок с ЧПУ Roland MDX540

В результате постоянной научно-исследовательской деятельности сотрудников кафедры «Кораблестроение» КНАГТУ [4; 5; 6] формируется комплект моделей судов различного типа и назначения для проведения испытаний в опытном бассейне. За последние несколько лет комплект пополнился множеством моделей судов для различных экспериментов. Среди них модель наплавного судна для проведения буксировочных испытаний на ГБС (см. рис. 9); модель ледокола «Москва» – эталонная модель для проведения тарировочных испытаний ГБС (см. рис. 10); модели грузовых судов с нетрадиционными крейсерскими формами корпусов для мореходных испытаний (см. рис. 11); модели судов с эллипсоидной формой корпуса для проведения экспериментов в рамках развития теории подобия (см. рис. 12).



Рис. 9. Модель наплавного судна во время буксировочных испытаний на ГБС

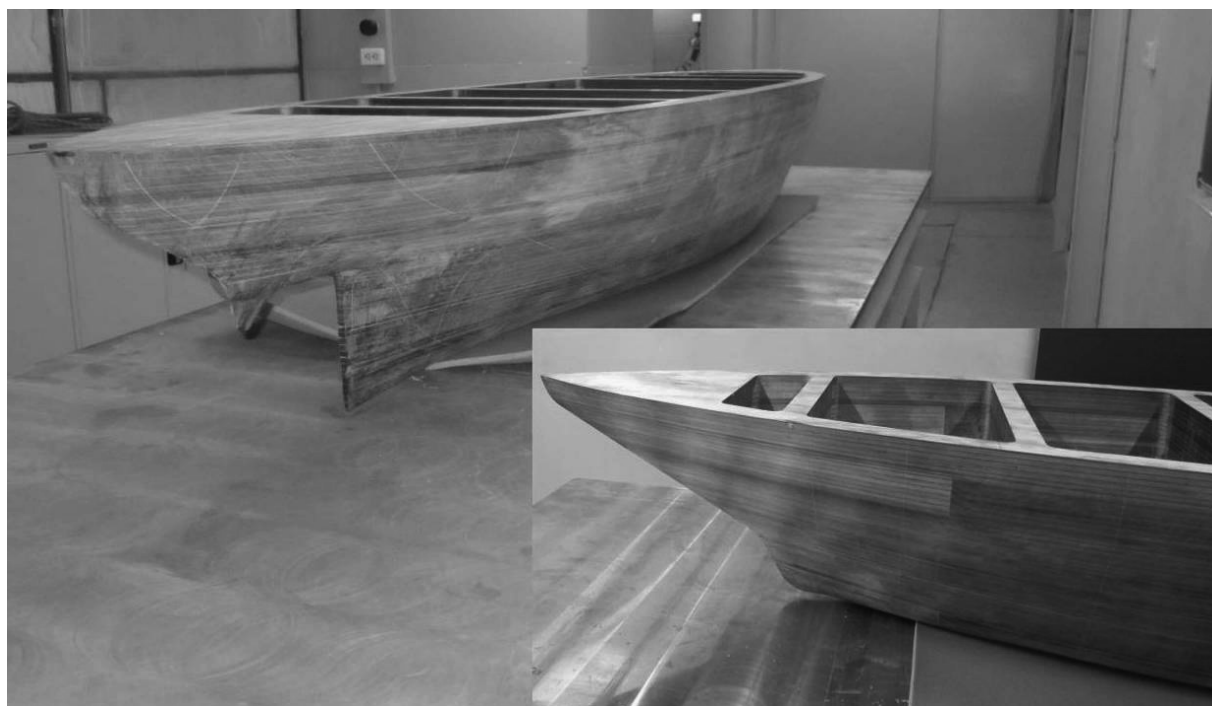


Рис. 10. Модель ледокола «Москва»



Рис. 11. Модели грузовых судов с нетрадиционными крейсерскими формами корпусов



Рис. 12. Модели судов эллипсоидной формы

### Программный комплекс Flow Vision

В рамках одной из научных работ для компьютерного моделирования буксировочных испытаний используется разработка отечественной компании ТЕСИС – программный комплекс FlowVision. Этот комплекс является CFD-пакетом (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика), который позволяет проводить численное моделирование гидродинамических (и не только) задач на персональном компьютере. Применение таких программ позволяет получить достаточно точные результаты испытаний и минимизировать затраты на их проведение по сравнению с модельными испытаниями в опытовых бассейнах.

К особенностям FlowVision можно отнести использование метода конечных объемов; применение модели свободной поверхности, описываемой уравнениями Навье-Стокса;  $k-\epsilon$  модели турбулентности и Volume of Fluid; автоматическую генерацию расчетной сетки с использованием метода подсеточного разрешения геометрии. Эти особенности в совокупности существенно облегчают и сокращают по времени процесс моделирования, а также снижают ресурсные требования к персональному компьютеру.

Комплекс FlowVision включает в себя следующие основные компоненты [1]: препостпроцессор (см. рис. 13); модуль просмотра результатов; солвер-агент; солвер.

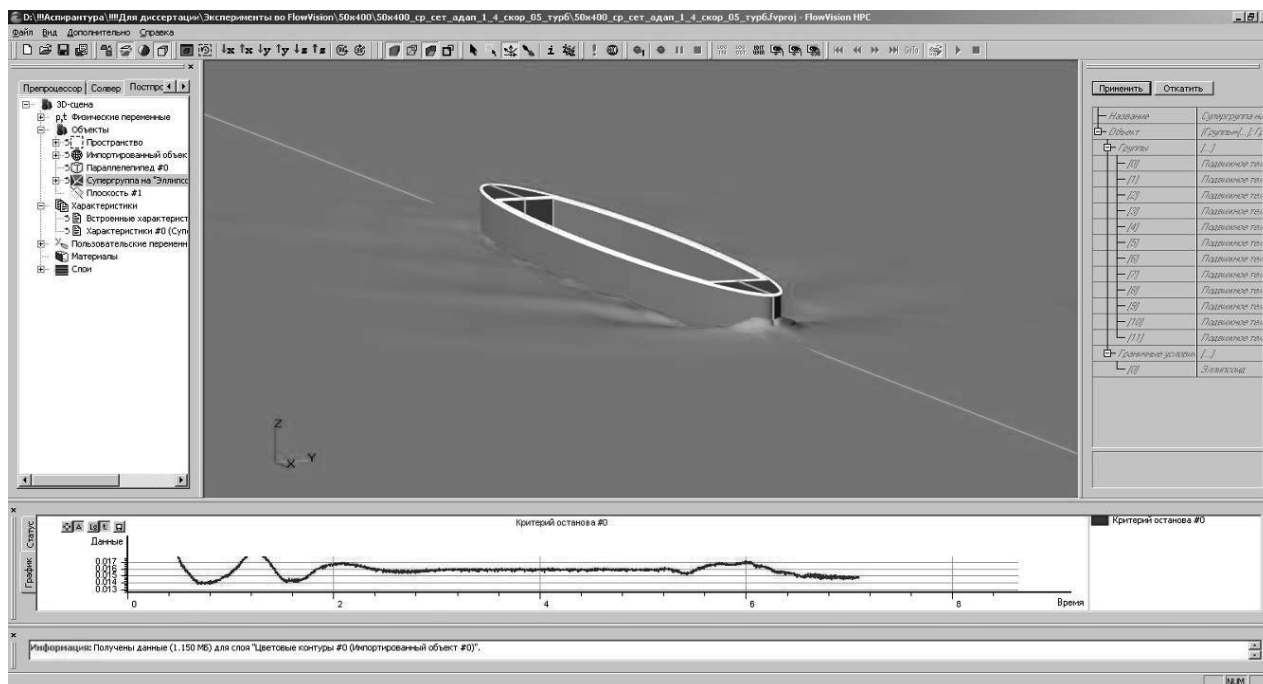


Рис. 13. Окно препостпроцессора программного комплекса FlowVision

### Система для измерений высокоскоростных вибраций

В составе лаборатории имеется система измерений высокоскоростных вибраций, основой для которой служит высокоскоростной виброметр HSV-2000 (см. рис. 14). Он выполняет одноточечные и дифференциальные измерения виброскоростей и перемещений. С его помощью могут быть измерены перемещения до 160 мм и скорости до 30 м/с, что является весьма важным для обнаружения высокочастотных вертикальных колебаний. Результаты измерений и разрешение не зависят от расстояния, свойств материала и температуры.

В состав системы HSV-2000 входит контроллер HSV-2001, лазерный модуль HSV-800 и прочная компактная сенсорная головка HSV-700. Лазерный модуль включает в себя интерферометр и лазер малой мощности.

Характеристики системы HSV-2000 в комплекте с опциями:

- 1) амплитуда до 81 мм;
- 2) рабочее расстояние 0,11 – 10,0 м;
- 3) частотный диапазон скорость/перемещение 0,5 Гц – 50/250 кГц;
- 4) измерение скоростей и перемещений при виброскоростях до 30 м/с.

В лаборатории опытового бассейна бесконтактный виброметр можно применять для замера затухающих колебаний во время судовой ходовой вибрации, а также вибрации при ударах о воду.



Рис. 14. Высокоскоростной виброметр HSV-2000

## Заклучение

Ведущая научно-исследовательская деятельность и модернизация как самого опытового бассейна, так и отдельных частей лаборатории способствует непрекращающемуся развитию экспериментальной базы опытового бассейна КНАГТУ. Это, в свою очередь, расширяет возможности использования опытового бассейна как гидродинамической лаборатории, а также способствует повышению качества проводимых экспериментов и точности получаемых результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision: руководство пользователя.– М.: ООО «ТЕСИС», 2012. – 329 с.
2. Тарануха Н. А. Модернизация и развитие дальневосточного опытового бассейна КНАГТУ / Н. А. Тарануха, С. В. Кошкин, Е. И. Селиванов, М. П. Шадрин // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. – Спец. выпуск № 2. – С. 45-48.
3. Тарануха, Н. А. Методика обработки результатов буксировочных испытаний в опытовом бассейне / Н. А. Тарануха, С. В. Кошкин, Е. И. Селиванов, М. П. Шадрин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1 (6). – С. 86-94.
4. Тарануха Н. А. Численное моделирование падения на воду тела с гофрированным дном / Н. А. Тарануха, С. Д. Чижумов // Прикладная механика и техническая физика. – Новосибирск: СО РАН, 2001, т. 42, № 4. – С. 112-118.
5. Taranukha N. A., Chizhiumov S. D. Numerical Simulation of the Fall of a Body with a Corrugated Bottom on Water // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2001, Vol. 42, No. 4, pp. 659-664.
6. Taranukha N. A., Koshkin S. V., Selivanov E. I., Shadrin M. P., Egorushkin S. V. and Gretchenko A. K. The Features of Towing Tests of Ship Models and Processing Results in a Small Testing Tank. Proceedings of Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – Vladivostok, PACOMS-2012. – pp. 165-169.

**Никифорова Г. Е.**  
**G. E. Nikiforova**

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОЖАРОВ И ИХ ПРИЧИН В НЕКОТОРЫХ  
НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ**

**FIRE DYNAMICS AND FIRE CAUSES IN SOME BUIL-UP AREAS  
IN THE KHABAROVSK REGION**

**Никифорова Галина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: nik\_end\_K@mail.ru

**Ms. Galina E. Nikiforova** – a PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Fire, Occupational and Life Safety, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Av. E-mail: nik\_end\_K@mail.ru

**Аннотация.** В работе приведен анализ динамики возникновения пожаров на различных объектах, а также пострадавших при этом людей. Выделены территории из рассматриваемых регионов, наиболее подверженные риску возникновения пожаров, а также группы людей с повышенным риском попадания в пожароопасную ситуацию для проведения в последующем адресных мероприятий.

**Summary.** The paper offers an analysis of fire break-out dynamics in different civil engineering objects, and also of the people whose health is harmed therein. We single out geographic areas in the Khabarovsk region most in jeopardy of fire breakout, and the groups of people with the increased risk of being involved in fire hazardous situations, with the purpose of further planning targeted programs and measures.

**Ключевые слова:** пожар, пострадавшие, погибшие, риск, тушение пожаров.

**Key words:** fire, injured, casualties, risk, fire control.

УДК 614.8(075.8)

Чрезвычайные ситуации в современной действительности все чаще становятся серьезной угрозой стабильности, наносят непоправимый ущерб здоровью и материальному достатку людей. Одно из первых мест среди них занимает пожарная опасность.

Проблема обеспечения пожарной безопасности является одной из серьезных и сложных сфер деятельности и каждый специалист должен иметь знания, позволяющие обеспечить личную безопасность и безопасность окружающих и сохранить объекты народного хозяйства.

Несмотря на повышение уровня противопожарной защиты и совершенствование пожарной охраны, ежегодно в мире возникает до 6 млн пожаров [2], т.е. каждые 5 – 6 с происходит в среднем один-два пожара. Ежегодные потери от пожаров достигают 1 % валового национального продукта, это означает, что три рабочих дня в году экономика страны работает на «пожар».

В работе представлен анализ динамики и причин возникновения пожаров и пострадавших в них людей ряда населенных пунктов Хабаровского края, в частности: Комсомольского района и г. Комсомольска-на-Амуре, Амурского района и г. Амурска, р. п. Солнечный и Солнечного район и района им. Полины Осипенко (см. рис. 1).

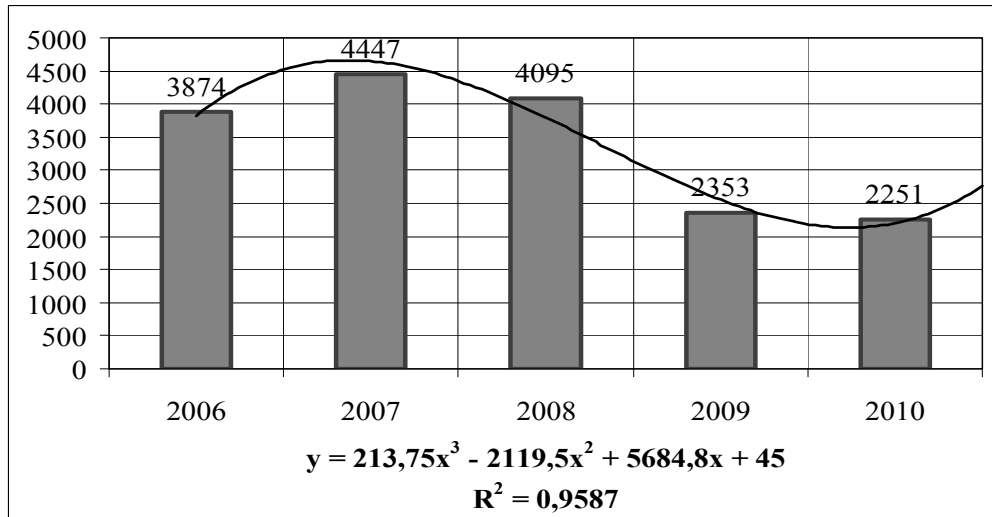


Рис. 1. Анализ динамики пожаров [1]

Анализ статистических данных и вывод уравнения кривой прогноза с коэффициентом корреляции  $R = 0,9587$  позволили сделать вывод, что число пожаров после 2010 г. будет неуклонно расти и в 2011 г. достигнет количества 3000 пожаров. Также необходимо отметить, что наиболее неблагоприятными в этом отношении являются населенные пункты г. Комсомольск-на-Амуре, г. Амурск и р. п. Солнечный, что объясняется как большой численностью населения, так и большим количеством объектов возгораний (см. рис. 2, а, б).

Анализ статистических данных показывает, что основными объектами пожаров в городах и сельской местности являются жилые дома, места хранения материальных ценностей, производственные и сельскохозяйственные здания. На рис. 3 приведен анализ динамики пожаров на различных объектах.

Количество пожаров за период с 2006 по 2008 гг. остается стабильно высоким (см. рис. 3) и лишь в течение последних двух лет имеет тенденцию к снижению. Наибольшее количество пожаров произошло в жилом секторе, что составляет 64 % от общего числа произошедших пожаров, 2 % составляют пожары в производственных зданиях, складах, базах производственных предприятий, 34 % – прочие объекты.

В жилых и общественных зданиях пожар в основном возникает из-за неисправности электросети и электроприборов, утечки газа, возгорания электроприборов, оставленных под напряжением без присмотра, неосторожного обращения и шалости детей с огнем, использования неисправных или самодельных отопительных приборов, оставленных открытыми дверей топок (печей, каминов), выброса горячей золы вблизи строений, беспечности и небрежности в обращении с огнем.

Среди жилых объектов следует выделить частный сектор, где пожары возникают, в основном, в домах с большой степенью износа, при нарушении эксплуатации печей и замыкания электропроводки, так как проводка была проведена без соблюдения установленных норм, а во многих домах проводка не менялась с самой постройки (см. рис. 3, а). Многие устанавливают дымоходы с нарушением элементарных правил безопасности – трубы проходят в непосредственной близости от легковоспламеняющихся конструкций, дымоходы не всегда герметичны. Но даже если печь или камин установлены по всем правилам, они нуждаются в постоянном уходе, о чём граждане забывают.

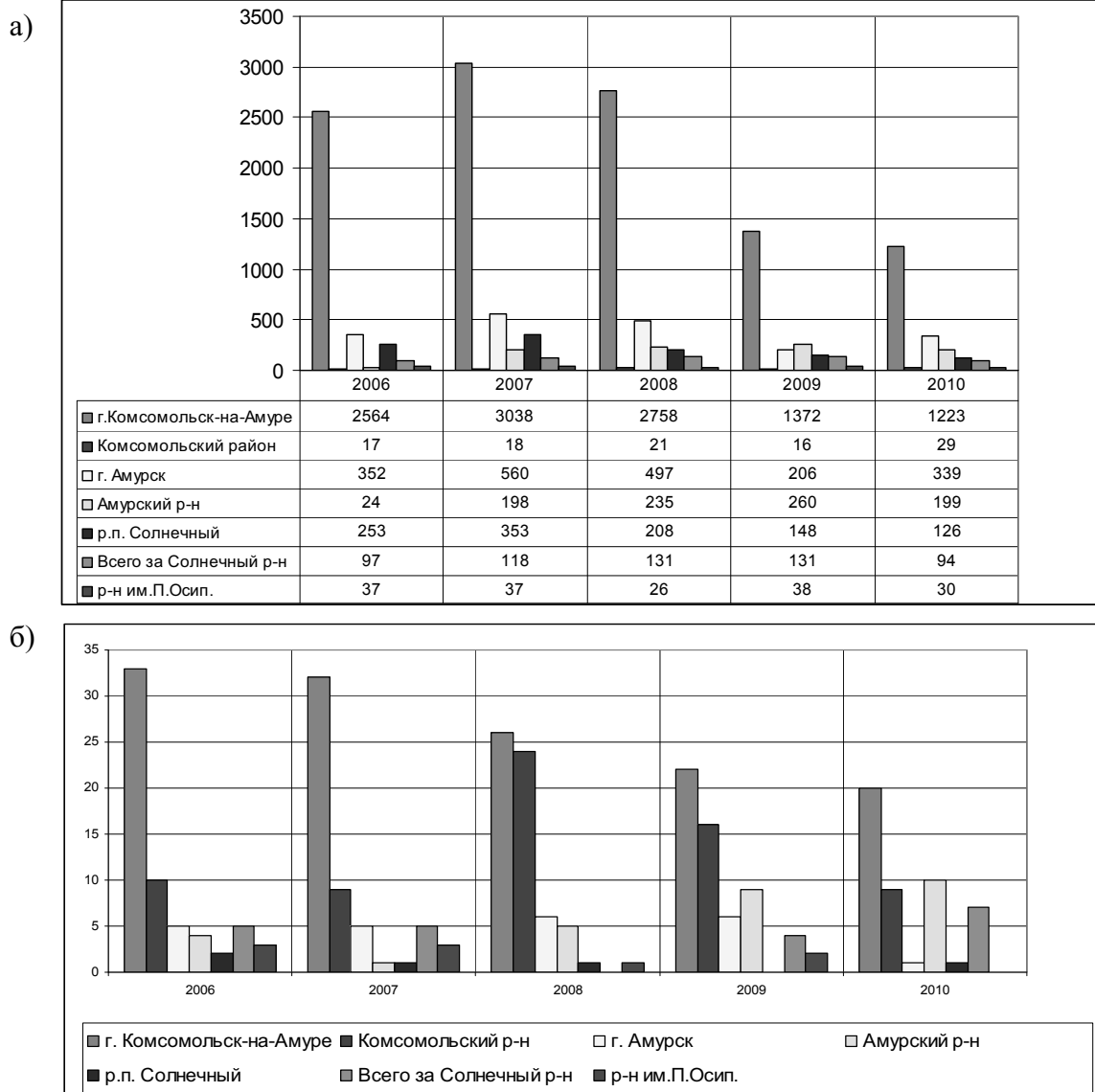
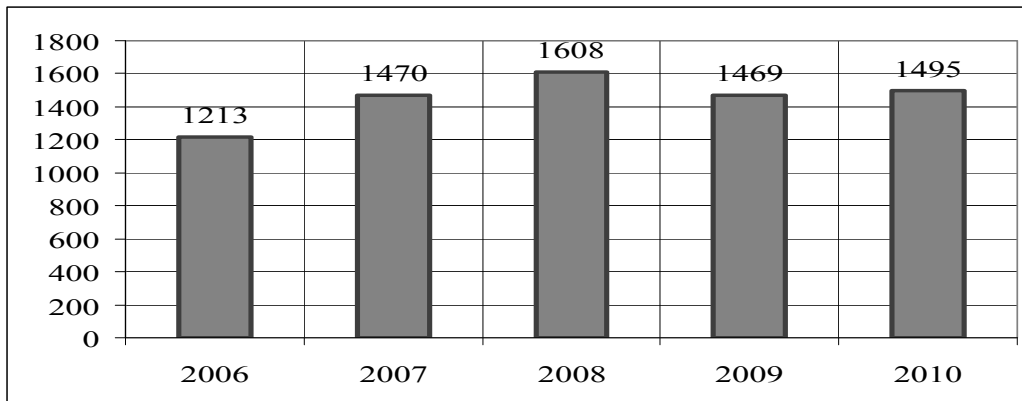


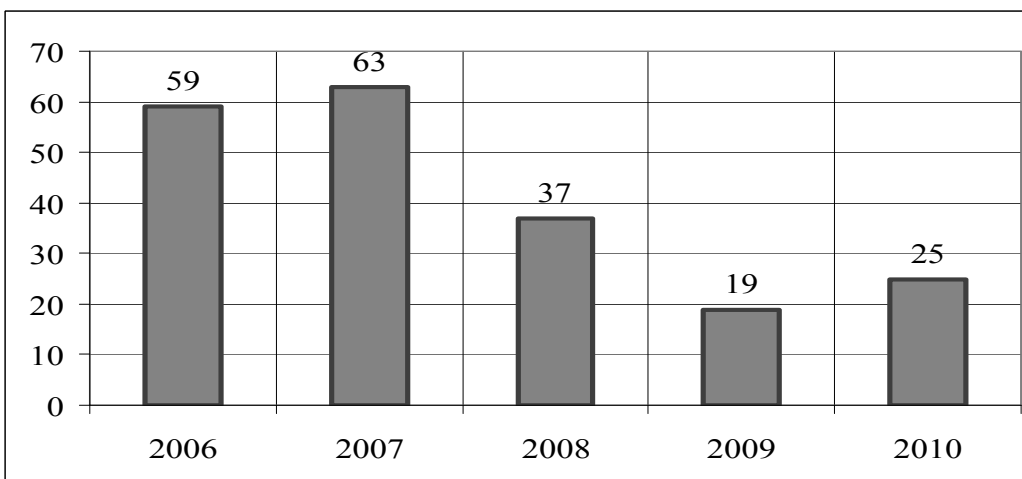
Рис. 2. Распределение количества пожаров по районам:  
а – число пожаров; б – количество погибших людей при пожаре

Распространению пожара на промышленных предприятиях способствуют: скопление значительного количества горючих веществ и материалов на производственных и складских площадях; наличие путей, создающих возможность распространения пламени и продуктов горения на смежные установки и соседние помещения; внезапное появление в процессе пожара факторов, ускоряющих его развитие; запоздалое обнаружение возникшего пожара и сообщение о нем в пожарную часть; отсутствие или неисправность стационарных и первичных средств тушения пожара; неправильные действия людей при тушении пожара. Около 60 % пожаров на промышленных предприятиях – следствие неосторожности или небрежности работающих. Чаще всего – это курение в неположенных местах, искры от электрогазосварочных, бензорезных и других огневых работ, разжигание костров и сварка битума вблизи сгораемых строений, шлак, небрежно выброшенный из топки котлов, применение факелов паяльных ламп для разогревания замерзших труб и т.п.

а)



б)



в)

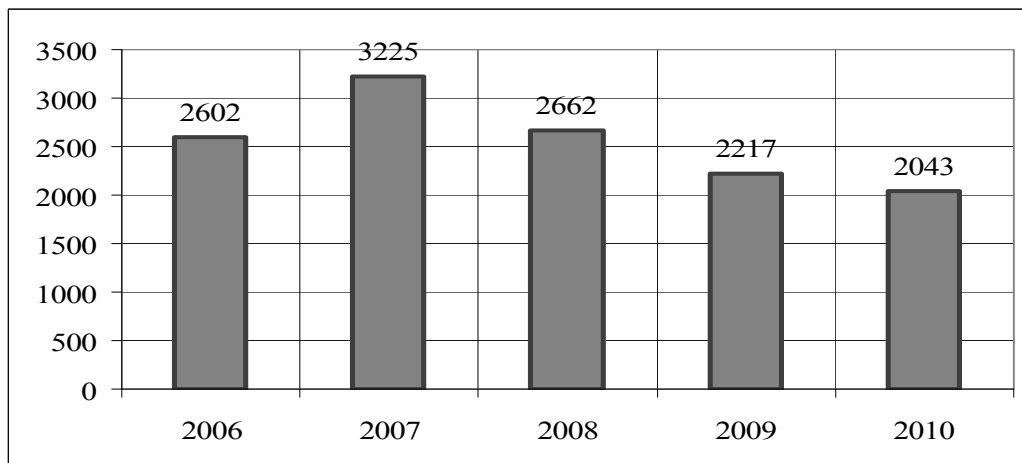


Рис. 3. Анализ динамики пожаров на различных объектах:  
а – жилой сектор в зоне реагирования; б – производственные здания;  
в – прочие объекты (нежилые здания, мусор)

Проведенный анализ позволил установить, что количество пожаров зависит также от временных параметров. Сезонные колебания количества пожаров зависят от климатических условий того или иного периода (см. рис. 4).

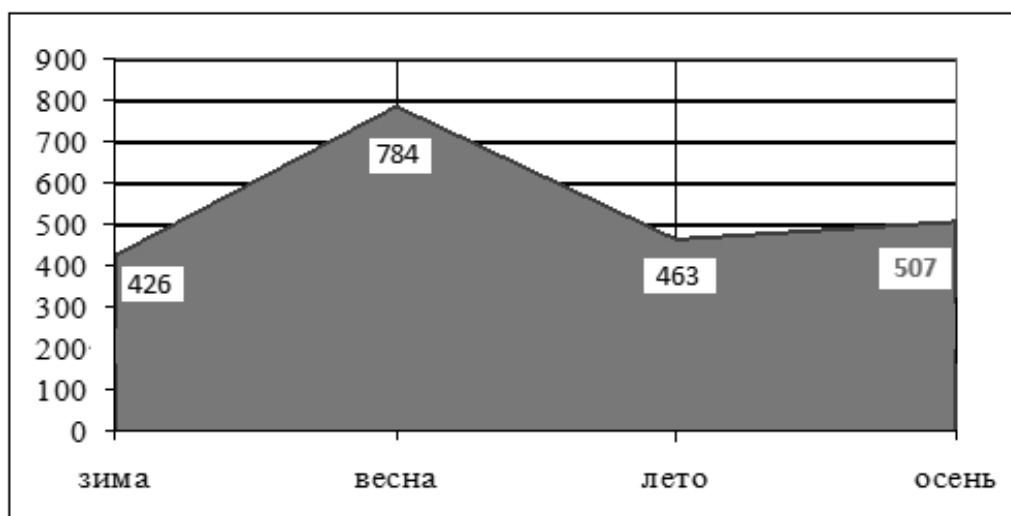


Рис. 4. Анализ динамики пожаров в зависимости от времени года

Как следует из приведенных данных (см. рис. 4), количества произошедших пожаров в течение года распределены неравномерно. Можно выделить весну: количество пожаров за этот период резко увеличивается до 36 %, это обусловлено началом дачного сезона, когда увеличиваются возгорания на территории дачных участков (см. рис. 5).

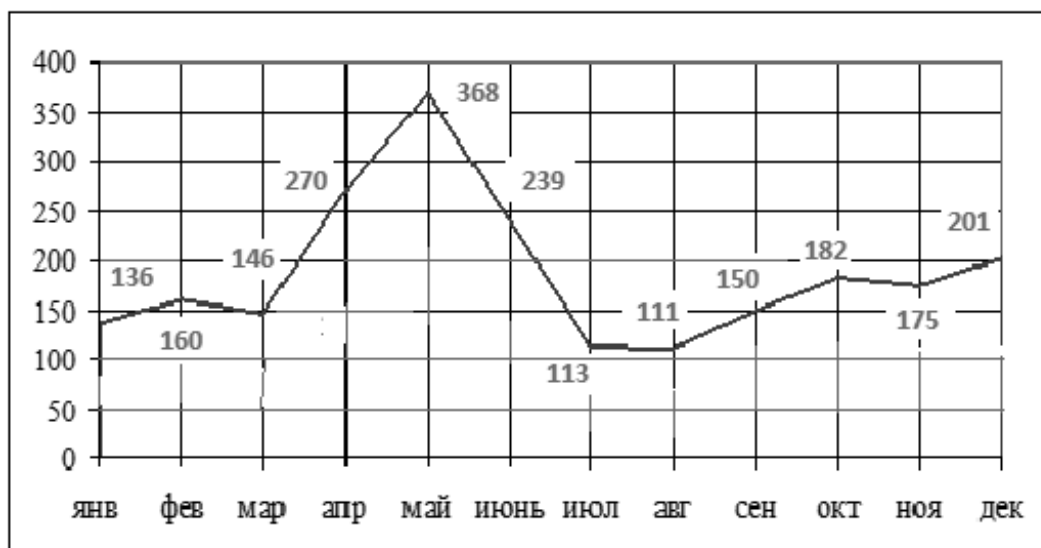


Рис. 5. Анализ динамики пожаров в течение года

Основное количество пожаров в холодный период года происходит в жилых домах, в то время как для летнего периода характерно увеличение пожаров на дачах, в садовых домиках. Это обусловлено началом дачного сезона (как видно из диаграммы пиковое количество пожаров приходится на май), когда дачники производят уборку на своих участках после зимы перед летним сезоном. В переходные осенне-зимние и зимне-весенние периоды основным фактором, влияющим на рост числа пожаров, являются дни с переходом температур от заморозков к оттепели и наоборот (начинается рост в марте и октябре).

Необходимо отметить, что наибольшее количество пожаров приходилось на воскресенье – 16,6 % от общего количества пожаров, наименьшее на пятницу – 13,4 % от общего количества пожаров (см. рис. 6).

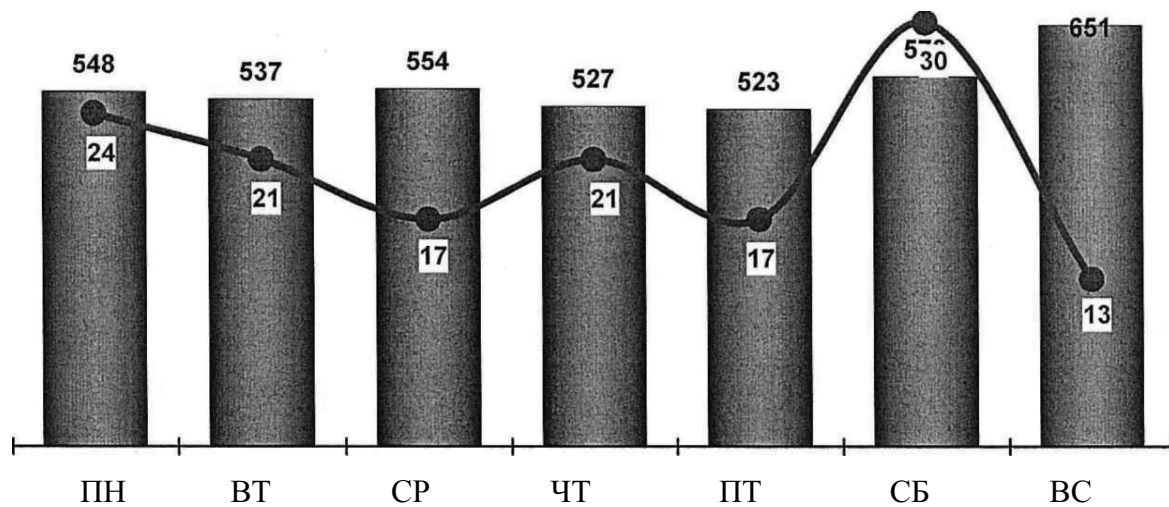


Рис. 6. Динамика пожаров в течение недели [1]

Проведенный в дальнейшем анализ пострадавших (см. рис. 7 – 11) при пожаре позволил установить, что 2008 г. характеризуется наибольшим количеством погибших людей при пожаре. Следует отметить, что этот период отмечен началом экономического кризиса, огромное количество предприятий, как во всем мире, так и на Дальнем Востоке сократили свои производственные мощности, и, как следствие, очень много людей потеряли работу. Потеря работы при склонности к употреблению алкоголем и/или наркотиков может являться одной из потенциальных причин увеличения числа погибших людей на пожарах. Число погибших после 2008 г. стремительно уменьшается (см. рис. 7).

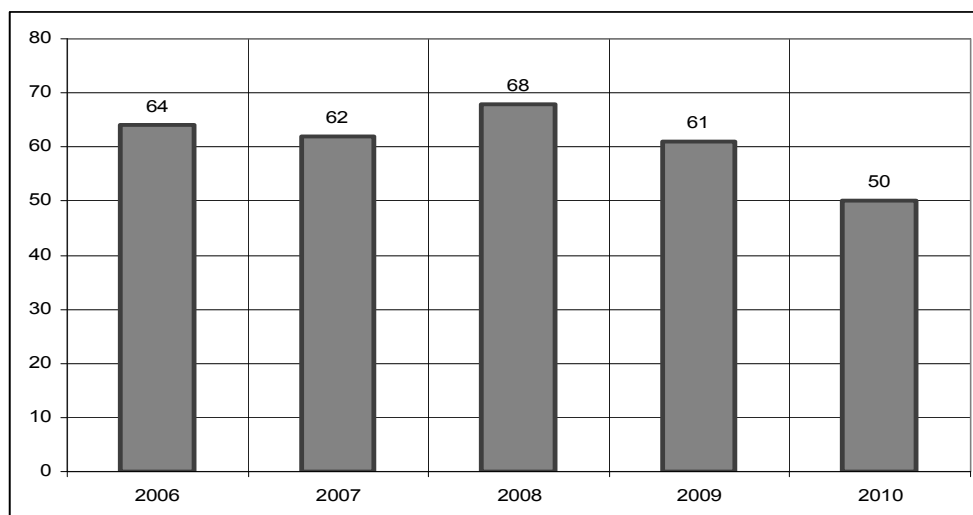


Рис. 7. Динамика погибших при пожаре людей

Социальная характеристика погибших при пожарах людей выглядит следующим образом: основную долю (около 73 %) числа погибших при пожарах людей составляет мужское население и лишь 27 % – женщины. Это соотношение остается практически неизменным на протяжении рассматриваемого периода (см. рис. 8). Подобное положение может быть объяснено психофизиологическими особенностями мужчин, склонных к большему риску и неосторожности, чем женщины. Кроме того, у мужчин выше уровень потребления алкоголя, что способствует увеличению риска погибнуть при пожаре.

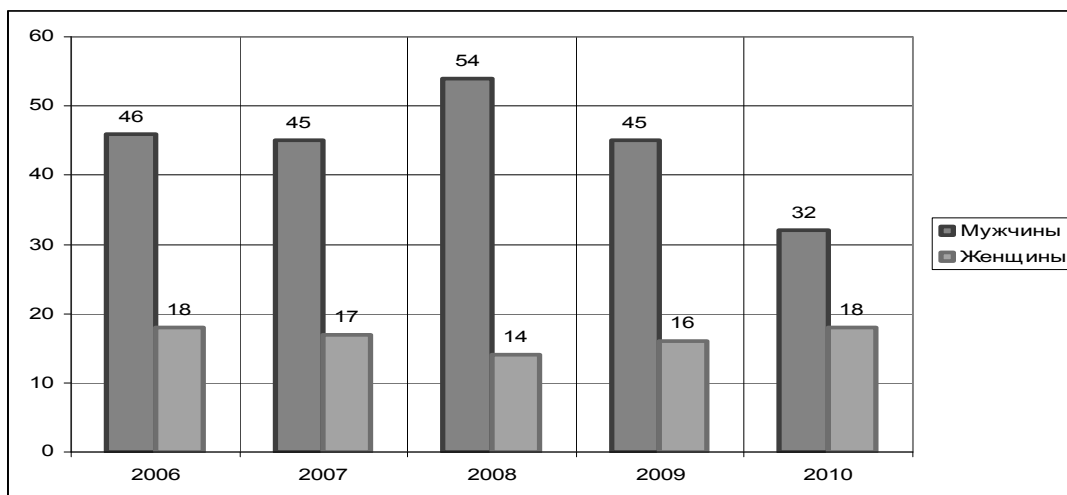


Рис. 8. Анализ количества погибших людей при пожаре (с учетом их пола)

Как видно из диаграммы (см. рис. 9), основная доля погибших людей на пожарах приходится на возрастную категорию от 40 до 60 лет. Причина может быть объяснена лишь различными бытовыми и социальными условиями проживания в городе и деревне, ограниченными возможностями профилактической деятельности пожарной охраны и худшими показателями оперативного реагирования при тушении пожаров.

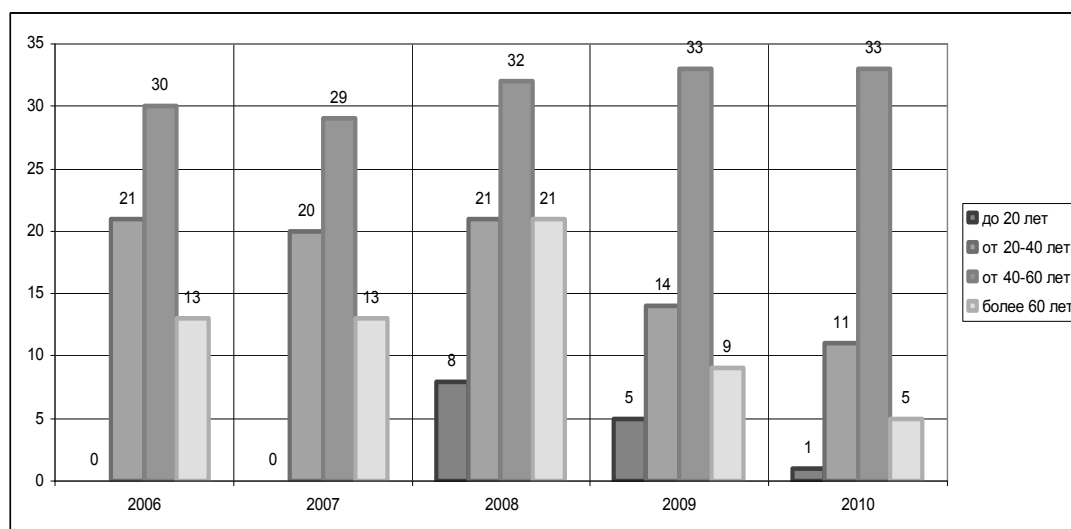


Рис. 9. Анализ количества погибших людей при пожаре (с учетом их возраста)

Кроме вышеперечисленных факторов, на показатель гибели людей при пожарах влияют сезонные и временные факторы (см. рис. 10). Сезонные колебания показателей обстановки с гибелью людей при пожарах зависят, в основном, от климатических условий того или иного периода.

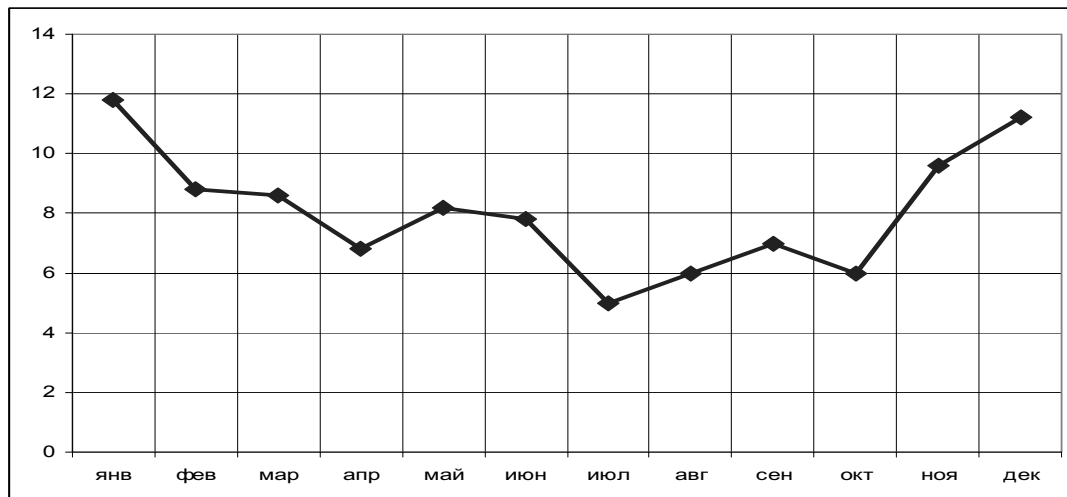


Рис. 10. Анализ числа погибших людей при пожаре по месяцам

Основное количество пожаров с гибелью людей в холодный период года происходит в жилых домах, в то время как для теплого периода характерно увеличение таких пожаров на дачах, в садовых домиках (рост диаграммы в апреле-мае – период основных посадок, сентябре – сбор урожая) и жилых домах сельской местности. В переходные осенне-зимние и зимне-весенние периоды основным фактором, влияющим на рост числа пожаров с гибелью людей, являются дни с переходом температур от заморозков к оттепели и наоборот. Несовпадение сроков отопительного сезона и сезонного колебания температур приводит к ярко выраженной сезонности (основное количество погибших людей при пожарах приходится на холодное время года).

Наибольшее количество погибших людей на пожарах приходилось на субботу – 21 % от общего количества погибших на пожаре людей (см. рис. 6). Основное время суток, когда погибали люди, это вечерние и ночные часы. Всего же за вечернее и ночное время (с 18 вечера до 6 часов утра) погибло порядка 67 % от общего количества погибших людей на пожаре (см. рис.11).

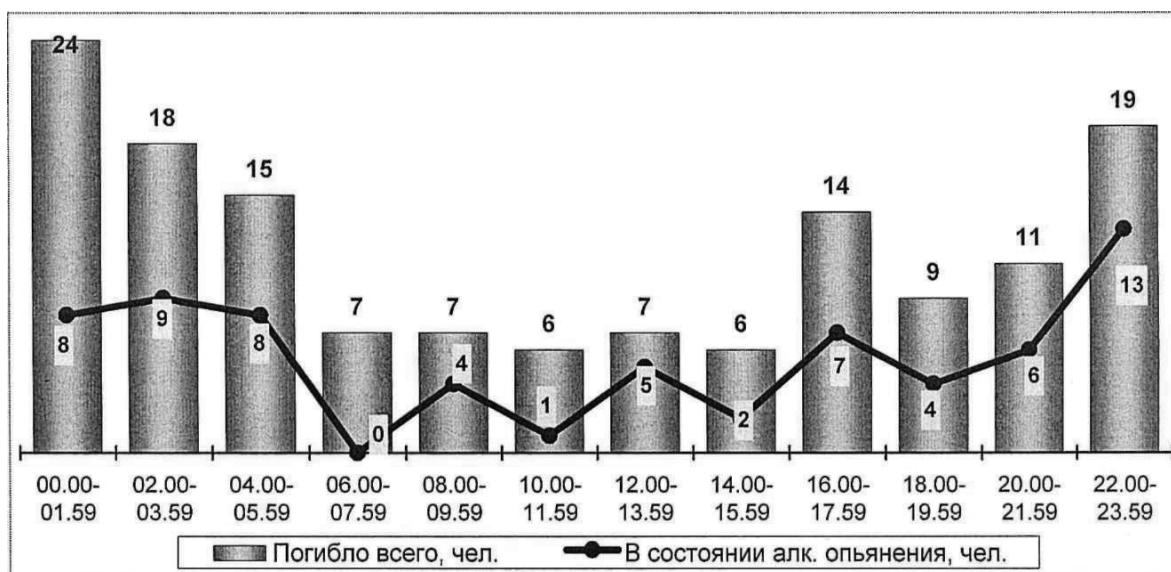


Рис. 11. Анализ количества погибших людей при пожаре в течение дня [1]

**Никифорова Г.Е.**

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОЖАРОВ И ИХ ПРИЧИН В НЕКОТОРЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ**

Необходимо помнить, что гибель людей отягощена их социальным положением, т.е. низким уровнем материального благосостояния, алкоголизмом. На этом фоне пожарная охрана, даже используя все доступные ей методы профилактики и виды агитации и пропаганды, вряд ли сможет добиться ощутимого результата. Таким образом, проблема большого числа пострадавших на пожарах – это не только совместная проблема властей и бизнеса, но и каждого человека в отдельности. Таким образом, снижение числа погибших при пожарах людей возможно при условии повышения общего уровня развития экономики и создания благоприятного социального климата.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Методические рекомендации по вопросам обеспечения пожарной безопасности объектов защиты: Главное управление Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий по Хабаровскому краю, 2012. – 41 с.
2. Степанова, И. П. Применение методов системного анализа к оценке опасности лесных пожаров / И. П. Степанова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 92-101.

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**CONSTRUCTIONS AND ARCHITECTURE**

**Дзюба В. А., Сюй Яфенг, Ковалев А. Л.**  
**V. A. Dzyuba, Xu Yafeng, A. L. Kovalev**

**ПРИМЕНЕНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ MTS  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК РАЗЛИЧНОГО АРМИРОВАНИЯ**

**USING MTS TESTING EQUIPMENT FOR DEFINING DEFORMATION PARAMETERS  
FOR TESTING REINFORCED CONCRETE BEAMS OF DIFFERENT TYPES  
OF REINFORCEMENT**

**Дзюба Виктор Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

**Mr. Victor A. Dzyuba** - Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina Pr. E-mail: fks@knastu.ru.

**Сюй Яфенг** – д-р Ph.D, профессор Шеньянского строительного университета (КНР, провинция Ляонинь, Шеньян); 110168, № 9, Хьюнан Ист Роуд. E-mail: ceufxu@sjzu.edu.cn.

**Mr. Xu Yafeng** – Ph.D, Professor at Shenyang Civil Engineering University (Peoples Republic of China, Liaoning, Shenyang); 110168, 9, Hunnan East Road. E-mail: ceufxu@sjzu.edu.cn

**Ковалев Андрей Леонидович** – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

**Mr. Andrew L. Kovalev** – PhD Candidate, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina Pr. E-mail: fks@knastu.ru.

**Аннотация.** В данной статье приведено описание испытаний железобетонных балок методом контролируемых перемещений с использованием оборудования фирмы MTS, которое позволяет создавать жесткий режим нагружения.

**Summary.** The paper describes the procedure of testing reinforced concrete beams by the method of controlled displacements using the equipment of MTS company that allows creating hard loading mode.

**Ключевые слова:** железобетон, предельная деформационная жесткость, полная диаграмма деформирования.

**Key words:** reinforced concrete, the ultimate deformation rigidity, full stress-strain diagram.

УДК 69.07

Современная теория деформирования железобетона с трещинами в значительной степени имеет эмпирическую основу. При этом совершенствование расчетов строительных несущих систем в нелинейной постановке с определением для них предельной нагрузки связано с применением опытных данных о поведении железобетонных элементов на стадии псевдопластического деформирования и при снижении отпорности, а именно с использованием полных диаграмм деформирования конструкций («момент – кривизна» и «момент – прогиб» при изгибе) [1]. Однако получение таких диаграмм на традиционном гидравлическом прессовом оборудовании при нагружении с постоянной скоростью роста усилий не представляется возможным. Известно, что в таких испытательных машинах, обладающих определенной податливостью, будет происходить внезапное разрушение образца на стадии, соответствующей нисходящему участку диаграммы, за счет высвобождающейся потенциальной энергии деформации системы [2].

Отличительной особенностью специализированного оборудования компании MTS, предназначенного для исследования свойств строительных конструкций, является наличие сервопривода (следящего привода) с управлением нагружением через отрицательную обратную связь. В составе сервопривода нагрузочного устройства имеется датчик положения (скорости деформирования, усилия) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике согласно заданному внешнему значению (см. прим. 1).

В соответствии с договором о научном сотрудничестве между КнАГТУ и Шэньянским строительным университетом (Shenyang Jianzhu University), КНР, в лаборатории строительных конструкций Шэньянского университета были проведены испытания железобетонных конструкций на поперечный изгиб. Оборудование данной лаборатории включает в себя испытательный стенд с гидроприводом MTS серии 243 с компьютерным контролем скорости деформирования, позволяющим проводить испытания на сжатие (50 т), растяжение (25 т), кручение, изгиб, усталостные и сейсмические воздействия.

Основой данного нагружающего устройства является гидроцилиндр 2 (см. рис. 1) с сервоклапаном и системой трубопроводов 3, что позволяет сохранять скорость перемещения поршня 4 неизменной в процессе нагружения. В месте крепления к силовой раме нагружающее устройство имеет шарнирное основание 1. Для контроля перемещений поршня предусмотрены специальные датчики (LVDT) 5, обеспечивающие передачу информации о перемещении поршня на электронную систему слежения. Значение нагрузки на каждой ступени нагружения фиксируется датчиком силы MTS 6 по величине электрического сигнала в предположении линейной работы динамометра. Нагрузка на образец передается через распределительную траверсу, для соединения с которой в нагружающем устройстве предусмотрен специальный шарнирный оголовок 7.

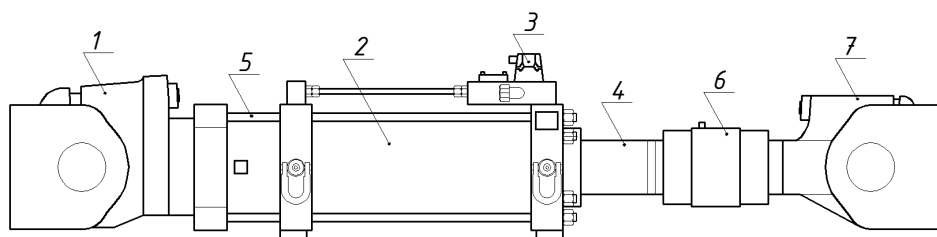


Рис. 1. Схема конструкции гидравлического привода MTS

Опытные образцы изготавливались из бетона класса В30 и продольной арматуры класса HRB 335 диаметром 14 и 20 мм при различном расположении поперечной арматуры. Схема армирования для одного из образцов приведена на рис. 2.

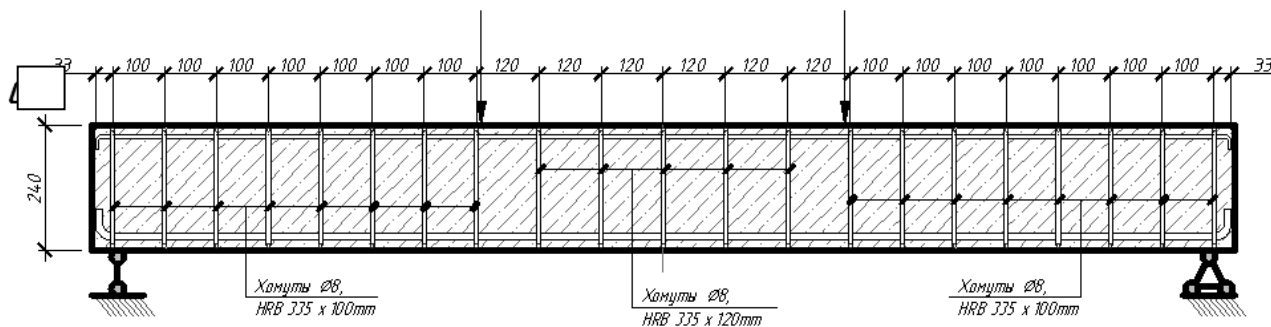


Рис. 2. Армирование опытного образца

Общий вид испытательной установки и схема расположения приборов изображены на рис. 3. Для построения линии прогибов балки использовались LVDT датчики 6 с ценой деления 0,01 мм, преобразующие вертикальное перемещение образца 4, с которым они

связаны механически, в электрический сигнал. Датчики устанавливались с шагом 175 мм по длине балки над опорами 7 для измерения осадки. Перемещения волокон в зоне чистого изгиба на верхней и нижней гранях балки измерялись электронными мессурами 8.

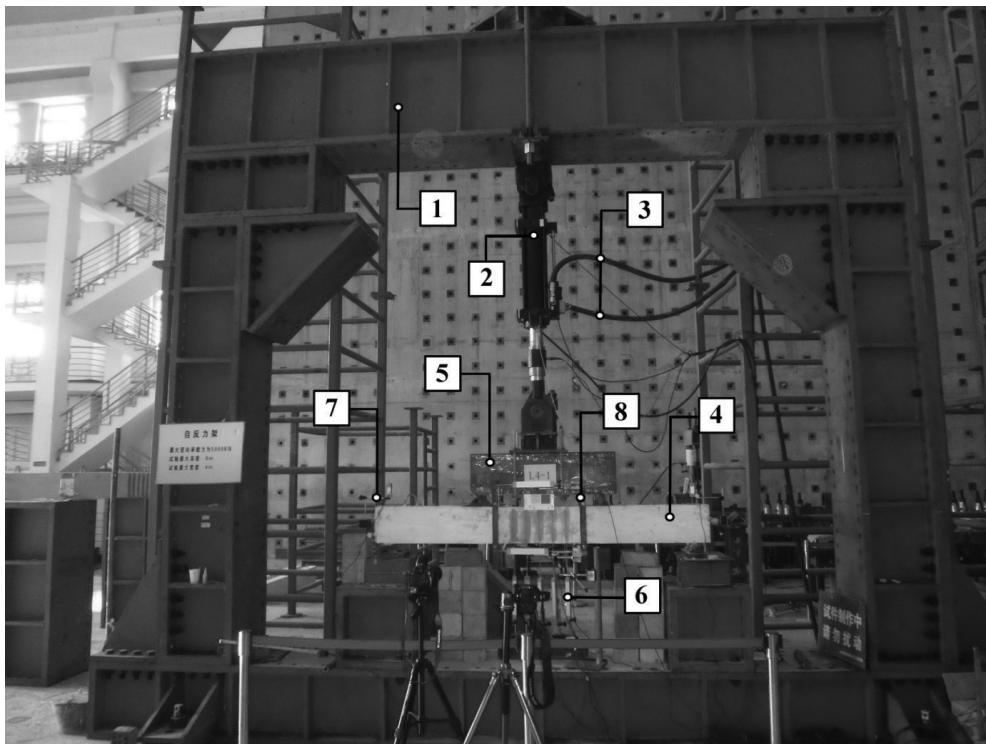


Рис. 3. Общий вид испытательной установки и схема расположения приборов:  
1 – жесткая порталная рама; 2 – гидравлический привод MTS;  
3 – шланги подачи масла; 4 – опытный образец; 5 – распределительная траверса;  
6 – LVDT датчики; 7 – индикатор для определения осадки опор; 8 – мессуры

Центрирование образца проводилось по мессурам, установленным на боковых гранях элемента. При пробных нагружениях в пределах 10 % от разрушающей нагрузки выбиралось такое положение образца, чтобы мессуры показывали одинаковое увеличение деформаций. Передача нагрузки от гидроцилиндра проводилась с помощью распределительной траверсы 5, а далее – через катки и распределительные пластины на образец.

Нагружение выполнялось ступенями с равномерным нарастанием заданной деформации в течение 1 мин. Деформация контролировалась по прогибомеру в середине пролета. После каждого этапа деформирования выдержка производилась в течение 2 мин до тех пор, пока не был достигнут предел прочности, и в течение 5 мин – после максимума нагрузки. В процессе выдержки происходила релаксация усилий, что было вызвано физической нелинейностью материала конструкции при нагружении с постоянной скоростью деформирования. Отсчеты по приборам и усилие в прессе измерялись автоматически каждые 2 с и в режиме реального времени строилась диаграмма «нагрузка – прогиб». Такой режим измерения позволял исключить погрешность в определении деформаций, связанную со временем снятия отсчетов.

Средняя продолжительность испытания балки составляла 5 ч. Всего было испытано 5 балок с различным армированием. Характер разрушения образца одной из серий показан на рис. 4.

Данное оборудование позволяет получать полные диаграммы деформирования железобетонных элементов (см. рис. 5) и оценивать их изгибную жесткость на стадии, близкой к разрушению.

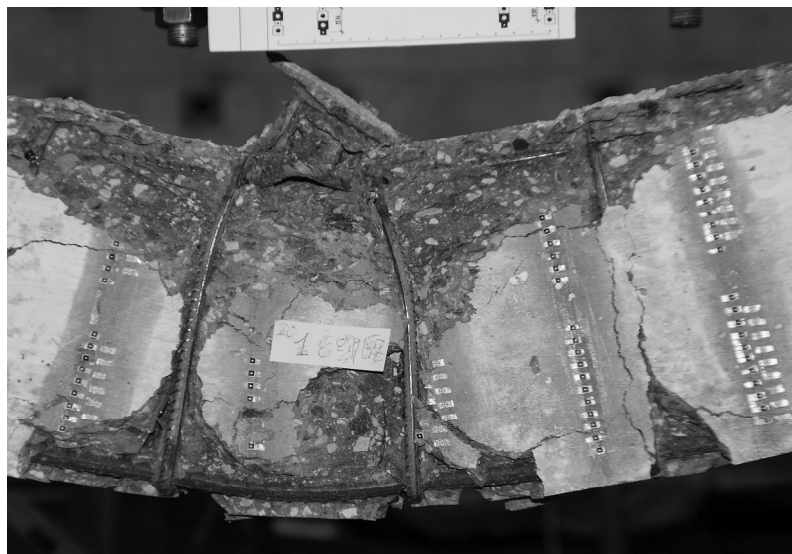


Рис. 4. Характер разрушения образца второй серии

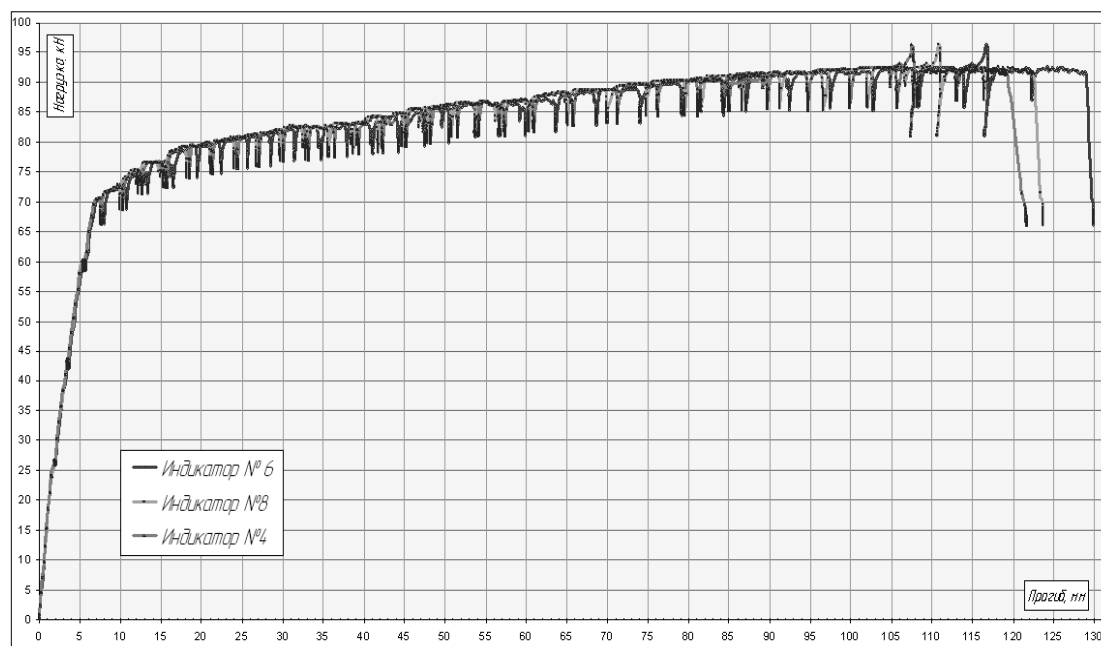


Рис. 5. Диаграмма «Нагрузка – прогиб» для образца второй серии, построенная по показаниям индикаторов в середине пролета

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарануха, Н. А. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 4-9.
2. Деформируемость и прочность массивов горных пород: моногр. / А. Н. Шашенко, Е. А. Сдвижкова, С. Н. Гапеев; под ред. А. Н. Шашенко. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. MTS Systems Corporation (2005). Civil, structural and architectural engineering testing capabilities. USA, MTS. Режим доступа: [http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev\\_002186.pdf](http://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/dev_002186.pdf)