

Гусева Р. И.
R. I. Guseva

ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ КОНТЕЙНЕРА ТОРМОЗНОГО ПАРАШЮТА САМОЛЕТА
ON ASPECTS OF AIRCRAFT BRAKING PARACHUTE CONTAINER ASSEMBLING

Гусева Роза Ивановна – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология самолетостроения», зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: r_guseva@knastu.ru.

Mrs. Roza I. Guseva – PhD in Engineering, Professor, Aircraft Building Technology Department, Deputy Dean of Aircraft Building Faculty, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: r_guseva@knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрены особенности сборочных операций на примере сборки контейнера тормозного парашюта самолета, приведена методика оценки точности сборки, выбран метод увязки для обеспечения взаимозаменяемости контейнеров тормозных парашютов, предложен вариант контейнера с разрезной внутренней обшивкой вместо сварной. Приведен вариант схемы членения контейнера, который обеспечивает оптимальный цикл сборки. Использован плазово-эталонный метод обеспечения взаимозаменяемости контейнеров, выбрано базирование по внешней поверхности обшивки. Проведена оценка точности сборки внешнего контура контейнера с использованием вероятностной методики расчета ожидаемой точности с привлечением статистических характеристик и отклонений размеров деталей и оснастки. Представлен перечень директивных сборочных операций для сборки контейнера, определен цикл основных сборочных операций и цикл сборки контейнера тормозного парашюта при организации односменной работы в сутки. Предложен вариант модернизации конструкции внутренней обшивки для обеспечения лучших условий труда при сборке. Для составления схемы сборки контейнера тормозного парашюта разработаны условия поставки основных деталей и сборочных единиц на сборку.

Summary. The features of assembly operations are considered using the example of assembling an aircraft braking parachute container; a method for estimating the assembly accuracy is presented; a method of linking is chosen to ensure the interchangeability of the brake parachute containers; a variant of a container with a split inner shell instead of a welded one is proposed. A variant of the container partitioning scheme that provides the optimal assembly cycle is given. A flat-standard method was used to ensure the interchangeability of containers, the basing on the outer surface of the skin was chosen. The accuracy of assembling the outer contour of the container was estimated using the probabilistic technique of calculating the expected accuracy with the use of statistical characteristics and deviations in the dimensions of parts and equipment. The list of directive assembly operations for the container assembly is presented, the cycle of the main assembly operations and the assembly cycle of the brake parachute container are determined in the organization of one-shift work per day. A variant of modernization of the internal cladding design is proposed to provide better working conditions during assembly. For the drawing up of the scheme for assembling the container of the brake parachute, conditions for the delivery of the main parts and assembly units for the assembly have been developed.

Ключевые слова: точность, взаимозаменяемость, способы базирования, агрегат, плазово-шаблонный, технология сборки.

Key words: accuracy, assembly, replace, substitute, assembly, aircraft, pattern, mould.

УДК 629.735

Отсек тормозного парашюта, куда укладывается тормозной парашют, состоит из отсека блока коммутации, в котором находятся два блока выброса; из контейнера тормозного парашюта (КТП), в котором расположены замок тормозного парашюта и сами тормозные парашюты. Также в отсек тормозного парашюта входят конус, который откидывается перед выпуском парашюта, и бортовые правый и левый обтекатели под антенны (см. рис. 1).



Рис. 1. Отсек тормозного парашюта

Контейнер тормозного парашюта без внешних обшивок представлен на рис. 2.

При сборке КТП должен отвечать определенным условиям по точности размеров и формы. КТП должен также обладать внутренней и внешней взаимозаменяемостью. Чтобы обеспечить эти два условия при сборке контейнера необходимо использовать сборочные приспособления, специальные способы базирования отдельных деталей и специальные методы взаимозаменяемости.

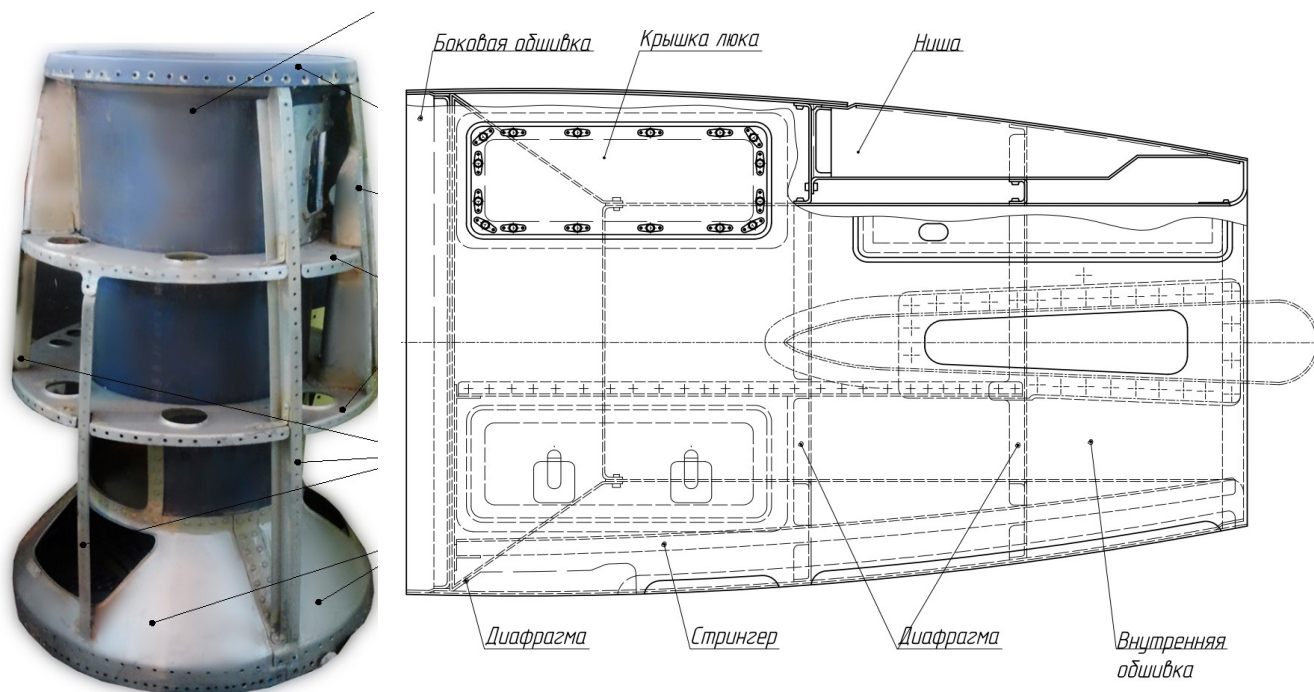


Рис. 2. Контейнер тормозного парашюта без внешних обшивок

В соответствии с теоретическим определением взаимозаменяемостью называется свойство конструкции составной части изделия обеспечивать возможность её применения вместо другой такой же части без дополнительной обработки с сохранением заданного качества изделия, в состав которого она входит.

Точностью какого-либо размера называется степень соответствия его действительного значения, заданного проектом, теоретическому значению. Под точностью сборочного контура понимают степень соответствия геометрических параметров готового изделия параметрам, заданным в чертежах и технических условиях.

Взаимозаменяемость и точность являются важнейшими технологическими показателями качества изделия.

Для разработки технологического процесса сборки контейнера вначале необходимо составить схему его членения (см. рис. 3).

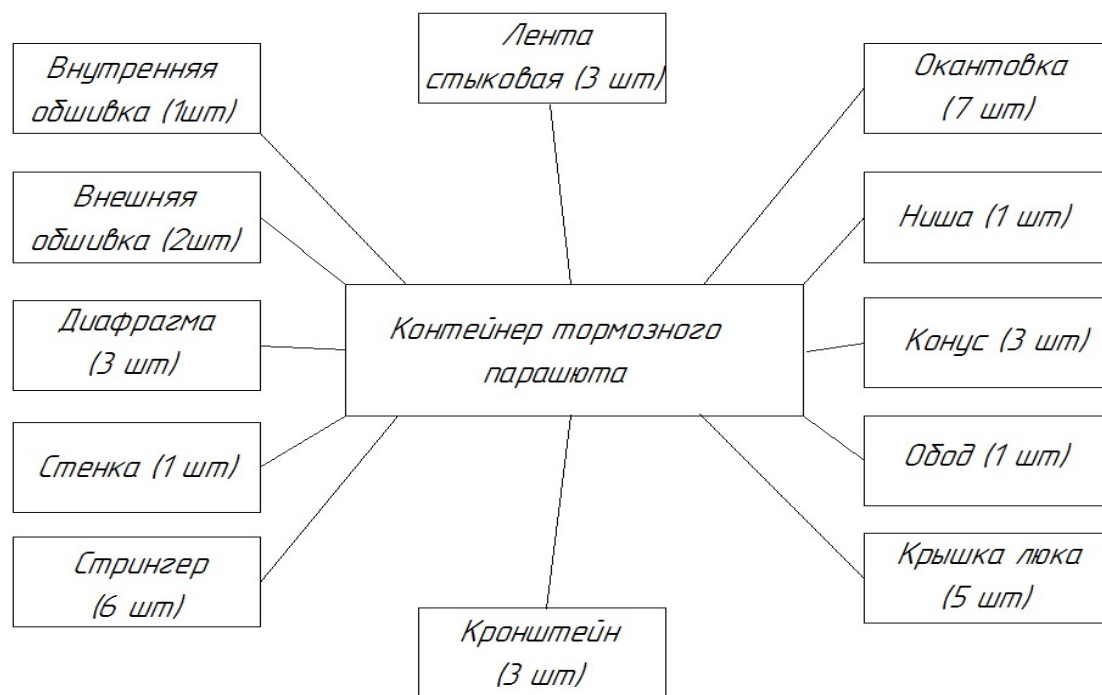


Рис. 3. Схема членения контейнера тормозного парашюта

Разработанная схема членения дает возможность организовать сборочные процессы и получить оптимальное количество подборок, входящих в контейнер.

Для сборочного процесса контейнера используют плазово-шаблонный метод взаимозаменяемости и разрабатывают схему увязки размеров изделия и оснастки (см. рис. 4). В представленной схеме ШКС – шаблоны контура сечений.

Точность сборки определяют производственные погрешности, которые появляются в процессе изготовления жестких носителей размеров (шаблонов, эталонов, слепков), и погрешности, которые появляются при проведении сборочных работ (погрешности увязки, погрешности клепки, температурные погрешности).

При расчете точности сборки оперируют различными типами производственных погрешностей, их разделяют на три основные группы:

1. погрешности изготовления рабочего носителя размеров (шаблона) $\delta_{\text{шабл}}$ или сборочного приспособления $\delta_{\text{пр}}$, погрешности базовой детали $\delta_{\text{баз}}$, погрешности калибра узла или разъема $\delta_{\text{к}}$;
2. погрешности увязки контуров базовой и устанавливаемой детали $\delta_{\text{кон (б-у)}}$, увязки приспособления и детали $\delta_{\text{кон (пр-дет)}}$, увязки двух сборочных приспособлений $\delta_{\text{шаблон (пр-пр)}}$;
3. погрешности, не зависящие от применяемого метода сборки: погрешности клепки $\delta_{\text{кл}}$, температурные погрешности $\delta_{\text{темп}}$, погрешности за счет деформации нежестких деталей $\delta_{\text{деф}}$, погрешности изменения толщины обшивки $\delta_{\text{обш}}$.

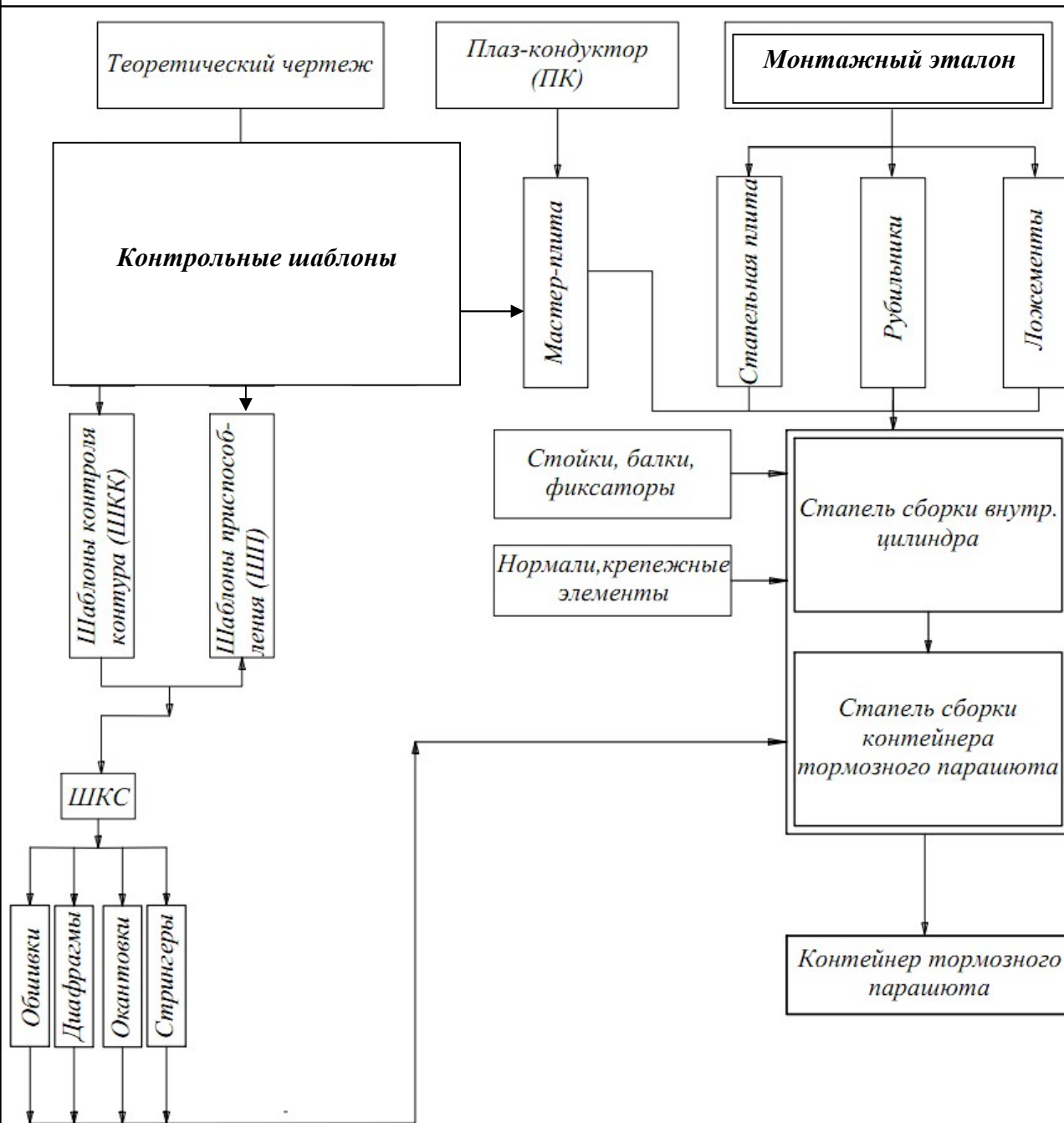


Рис. 4. Схема увязки размеров деталей и оснастки для обеспечения взаимозаменяемости контейнера тормозного парашюта при плазово-шаблонном методе

Для обеспечения точности сборного контура КТП выбрано базирование по внешней поверхности обшивки. В этом случае сборочной базой являются рабочие поверхности рубильников сборочного приспособления – станеля (ложементы), которые копируют теоретический контур внешней обшивки КТП.

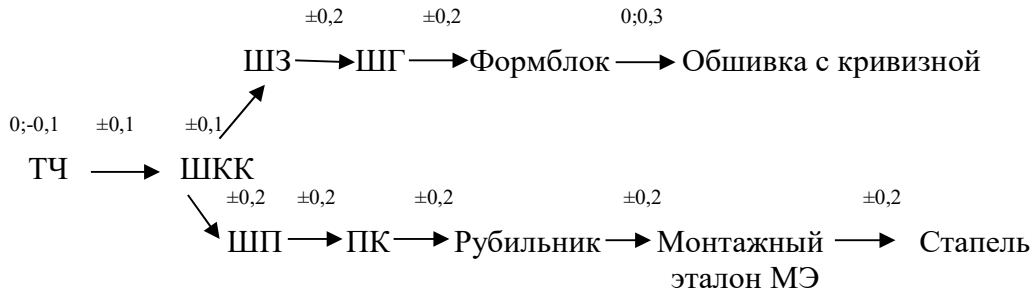
При выбранном способе базирования уравнение погрешности сборки контейнера парашюта запишется

$$0,6\delta_{сб} = \delta_{пр} + \delta_{кон(пр-дет)} K_{приж} \quad (1)$$



где $\delta_{сб}$ – точность сборки внешнего контура готового агрегата; $\delta_{пр}$ – погрешность изготовления и монтажа базовых элементов стапеля; $\delta_{кон(пр-дет)}$ – погрешность увязки базовых размеров стапеля и устанавливаемой детали; $K_{приж}$ – коэффициент прижима рубильников к изделию.

После разработки схемы увязки и определения отклонений размеров по этапам (верхнее отклонение – ВО и нижнее отклонение – НО), выбрана следующая схема увязки оснастки и детали:



где ТЧ – теоретический чертеж; ШКК – шаблон контроля контура; ШЗ – шаблон заготовки; ШП – шаблон приспособления; ПК – шаблон в плаз-кондукторе.

На основе принципов теории вероятности и теории сборочных размерных цепей решение уравнения погрешностей (1) сводится к определению двух основных статистических характеристик: координаты центра группирования погрешностей сборки Δ_{Σ} и среднеквадратичного отклонения или половины поля допуска замыкающего звена δ_{Σ} .

Тогда погрешность замыкающего размера $\Delta_{зам}$ определится как сумма найденных значений этих двух статистических характеристик:

$$\delta\Delta_{зам} = \Delta_{\Sigma} + \delta_{\Sigma}.$$

Формулы для определения статистических характеристик следующие:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum (A_i \Delta_i + A_i \delta_i \alpha_i); \quad \delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{A_i^2 \delta_i^2 K_i^2},$$

где A_i – передаточное отношение; Δ_i – координата центра группирования погрешностей составляющего звена; δ_i – среднеквадратичное отклонение составляющего звена; α_i – коэффициент относительной асимметрии распределения составляющего звена; K_i – коэффициент относительного рассеивания размера составляющего звена.

Статистические характеристики составляющих звеньев Δ_i и δ_i по различным этапам в цепочках схемы увязки определяются:

- координата центра группирования погрешностей составляющих i -х звеньев

$$\Delta_i = \frac{ВО_i + НО_i}{2},$$

где ВО_{*i*} и НО_{*i*} – соответственно верхнее и нижнее предельные отклонения размеров составляющих звеньев;

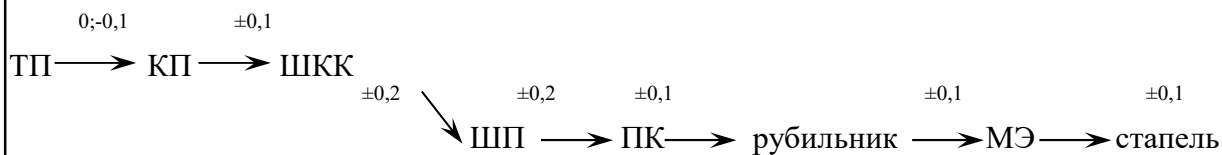
- среднеквадратичное отклонение, или половина поля допуска составляющего звена

$$\delta_i = \frac{ВО_i - НО_i}{2}.$$

Величины ВО_{*i*} и НО_{*i*} выбирают из таблицы отклонений по этапам в схеме увязки. В таблицах указываются среднестатистические значения верхних и нижних отклонений размеров при переходе с одного этапа на другой.

Так как уравнение (1) содержит две составляющие погрешности, то расчет ожидаемой точности проводят для погрешности приспособления (стапеля) $\delta_{пр}$ и для погрешности $\delta_{кон(пр-дет)}$.

Необходимо учесть, что при определении погрешностей приспособления $\delta_{пр}$ суммируются все отклонения размеров по этапам структурной схемы увязки только для цепочки приспособления начиная с первоисточника:



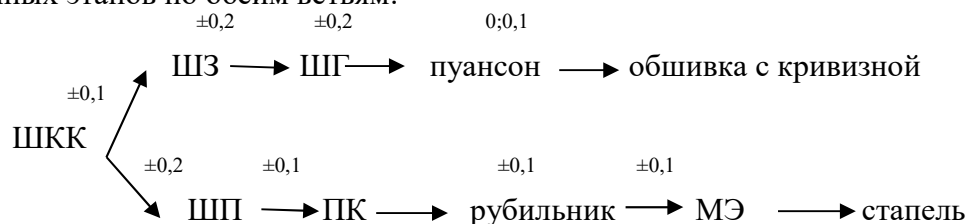
Расчеты оформляются в виде табл. 1.

Таблица 1

Расчет ожидаемой точности приспособления

Этап	ВО, мм	НО, мм	δ_i , мм	A_i	Δ_i , мм	α_i	K_i	$\Delta_i A_i$, мм	$A_i \delta_i \alpha_i$, мм	$A_i^2 K_i^2 \delta_i^2$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ТП-КП	0	-0,1	0,05	1	-0,05	0	1,0	-0,05	0	0,0025
КП-ШКК	0,1	-0,1	0,1	1	0	0,5	1,4	0	0,05	0,0196
ШКК-ШП	0,2	-0,2	0,2	1	0	0,5	1,4	0	0,1	0,0784
ШП-ПК	0,2	-0,2	0,2	1	0	0,5	1,4	0	0,1	0,0784
ПК-рубильник	0,1	-0,1	0,1	1	0	0,5	1,4	0	0,05	0,0196
рубильник-МЭ	0,1	-0,1	0,1	1	0	0	1,0	0	0	0,01
МЭ-стпель	0,1	-0,1	0,1	1	0	0	1,0	0	0	0,01
Итого:								-0,05	0,3	0,2185

При определении же погрешности увязки $\delta_{кон}$ (пр-дет) суммируются погрешности только не-связанных этапов по обеим ветвям:



Расчеты погрешности увязки также ведут табличным способом.

Коэффициент прижима $K_{приж}$ выбирают также по таблицам исходя из числа рубильников в стапеле и расстояния между ними.

Если расчетное значение погрешности сборки получилось меньше допуска, предусмотренного техническими условиями (по ТУ $\delta_{сб} = \pm 2,0$ мм), это означает, что принятая схема увязки размеров деталей и оснастки, а также используемый способ базирования выбраны. Изделие будет точным в пределах допуска по размерам и взаимозаменяемым.

Для составления схемы сборки КТП разрабатываются условия поставки основных деталей на сборку (см. табл. 2).

Далее прорабатывают схему сборки КТП. На сборке работы ведутся параллельно и последовательно:

- сборка внутреннего цилиндра КТП – 1,5 дня;
- сборка каркаса КТП – 1,5 дня;
- подгонка обшивок КТП – 2,5 дня;

- герметизация – 1 день;
- клепка КТП на герметике – 2 дня;
- контрольные операции – 0,5 дня;
- герметизация (нанесение ЛКП, гермотиснение) – 2-3 дня;
- взвешивание – 0,5 дня.

Таблица 2

Условия поставки узлов и основных деталей на участок сборки КТП

Наименование	Степень законченности
1. Обшивки внутренние	Технологический припуск +5 мм
2. Стенки	Обработаны в окончательные размеры; просверлены направляющие отверстия НО
3. Конусы	Технологический припуск +3 мм
4. Ленты	Обработаны в окончательные размеры; просверлены направляющие отверстия НО
5. Уголки	Обработаны в окончательные размеры
6. Обод	Обработаны в окончательные размеры
7. Стрингеры	Обработаны в окончательные размеры; просверлены НО
8. Диафрагмы	Просверлены НО
9. Обшивки наружные	Технологический припуск +5 мм
10. Окантовки	Обработаны в окончательные размеры; просверлены НО отверстия
11. Крышки люков	Обработаны в окончательные размеры

Такой подход обеспечивает наиболее короткие сроки сборки без снижения качества изделия. Затем осуществляют контроль сборки, и головки заклепок покрывают сырой грунтовкой ЭП-0215. Резьбовую часть с гайками и шайбами покрывают грунтом ЭП-076 и ЭП-140 в 2 слоя.

Для определения длительности производственного цикла сложного процесса сборки строят цикловой график. По расчетам цикл сборки составляет около 12 рабочих дней при односменной работе в день.

В процессе анализа сборки КТП выявлена проблема снятия внутренней обшивки из сборки КТП (внутренняя обшивка плотно прилегает к диафрагмам, создавая для сборщика трудности при ее выемке из сборки для выполнения клепальных работ).

Для решения возникшей проблемы предлагается сделать внутреннюю обшивку не сварной, а разрезной. Для компенсации разреза в месте стыка краев внутренней обшивки необходимо установить накладку (см. рис. 5). При этом придется конструктивно изменить и диафрагмы, непосредственно устанавливающиеся на внутреннюю обшивку, а именно: на диафрагмах должны быть выполнены подсежки под накладку.

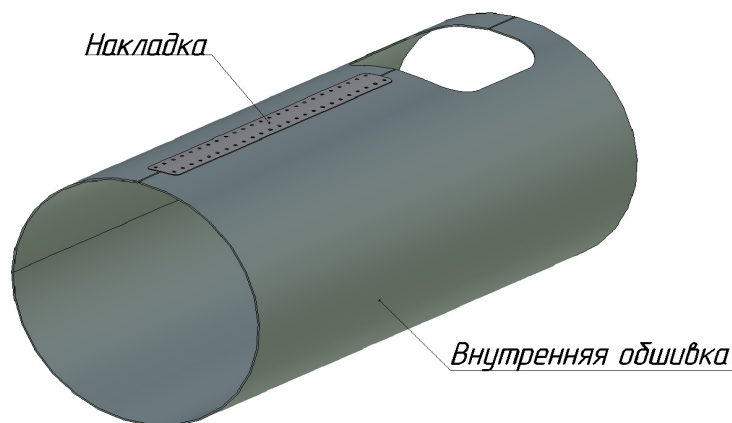


Рис. 5. Расположение накладки на внутренней обшивке КТП

На рис. 6 показано поперечное сечение КТП с указанием расположения накладки 2 относительно диафрагмы 1 и внутренней обшивки 3.

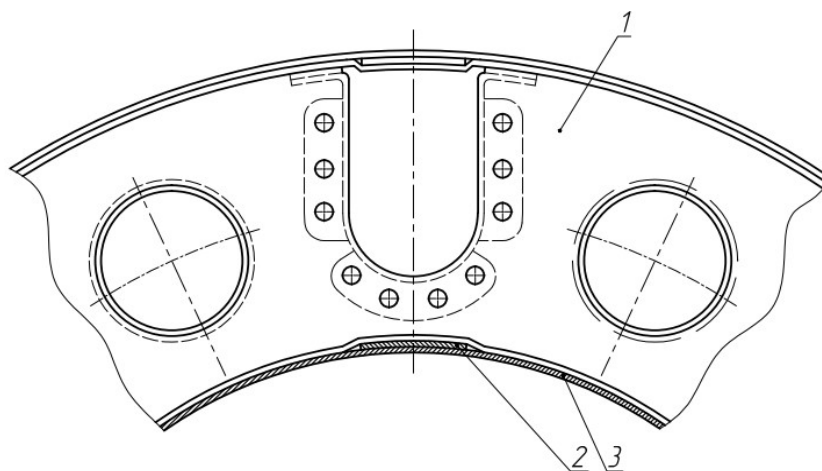


Рис. 6. Расположение накладки относительно диафрагмы

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусева, Р. И. Технологическая оснастка в сборочных процессах при производстве самолетов: учеб. пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 122 с.
2. Современные технологии авиастроения / под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 532 с.
3. Гусева, Р. И. К вопросу расчета точности сборки узлов и агрегатов / Р. И. Гусева // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Наука о природе и технике. – 2011. – № 1-1(5). – С. 16-22.

Лелюхин В. Е., Колесникова О. В., Лисичкин П. П.
V. E. Lelyukhin, O. V. Kolesnikova, P. P. Lisichkin

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ И СОПРОВОЖДЕНИЕМ
КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

**AUTOMATION OF DEVELOPMENT AND SUPPORT OF DESIGN DOCUMENTATION
MANAGEMENT**

Лелюхин Владимир Егорович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. +7914 723 5257. E-mail: lelv0@mail.ru.

Mr. Vladimir E. Lelyukhin – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7914 723 5257. E-mail: lelv0@mail.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. +7914 652 9780. E-mail: miis@mail.ru.

Ms. Olga V. Kolesnikova – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7914 652 9780. E-mail: miis@mail.ru.

Лисичкин Павел Павлович – старший преподаватель кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. +7914 707 0301. E-mail: plisichkin@mail.ru.

Mr. Pavel P. Lisichkin – Senior Lecturer, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7914 707 0301. E-mail: plisichkin@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются функциональные свойства PDM/PLM-систем и условия их применения для автоматизации управления выполнением проектно-конструкторских работ в отечественном машиностроении. В ходе выполнения проектов коллективами исполнителей особую значимость приобретает обеспечение оперативного информационного обмена между исполнителями и корректного отображения любых изменений в конструкторских документах. При этом важно хранить историю всех, даже малейших корректировок в свойствах и образе проектируемых объектов и систем. Приведены примеры эффективного использования PLM-системы Search на предприятиях Приморского края.

Summary. The paper discusses the functional properties of PDM/PLM systems and the conditions for their application to automate the management of design work in domestic mechanical engineering. In the course of project implementation, the provision of timely information exchange between performers and the correct display of any changes in design documents is of particular importance. In this case it is important to keep the history of all even the slightest adjustments in the properties and image of the projected objects and systems. The authors give examples of the effective use of the Search system PLM in the enterprises of the Primorsky Territory.

Ключевые слова: машиностроение, конструкторская подготовка, управление конструкторской документацией, автоматизация управления, PDM-системы, PLM-системы.

Key words: engineering, design training, management of design documentation, automation of management, PDM systems, PLM systems.

УДК 658.52:658.5.011

Введение

Качество выполнения конструкторских работ, полнота и корректность оформления конструкторской документации, а также соблюдение условия информационной необходимости и достаточности определяют эффективность дальнейшей работы, связанную с подготовкой производства и изготовлением продукции, в связи с возрастающей сложностью изделий и ужесточением

требований не только к самой конструкторской документации, но и к её хранению, поиску нужных документов, тиражированию, ограничению доступа и т.д., иными словами к управлению конструкторским документооборотом [1; 2; 3].

В прошлом столетии, когда чертежи, составляющие основу технической документации, выполнялись вручную на кульмане на производственных предприятиях и в конструкторских бюро, существовали специальные службы хранения и сопровождения этой документации. Широкое распространение информационных технологий и появление САД-систем породило проблему необходимости оперативного и корректного отслеживания быстрорастущих объемов конструкторской документации в виде файлов различных типов [4].

В конце 1980-х годов, когда отчетливо стали проявляться признаки «потери управляемости» возрастающим потоком сложно структурированных конструкторских документов, возникли первые EDM (Engineering Data Management), а затем PDM (Product Data Management) системы [4]. Следующим этапом развития систем управления техническим документооборотом стали PLM (Product Lifecycle Management) системы, которые обеспечили хранение и управление файлами документов, поддержку специализированных документов, характеризующих состав и структуру элементов изделий, управление уровнями, версиями и ревизиями документов, а также их оперативную визуализацию [2; 4; 5].

Такая функциональность PLM-систем позволяет им быстро обращаться к стандартным элементам, структурам спецификации и файлам для повторного использования и деривации, одновременно снижая риск использования неправильных версий дизайна и увеличивая повторное использование существующей информации о продукте. Тем самым PLM-системы позволяют реализовать комплексный подход ко всем аспектам информационной жизни продукта с момента его создания, изготовления, развертывания и обслуживания, а также организацию его вывода из эксплуатации и окончательного удаления [2; 4; 6].

По мнению Джона Тереско, выгоды от операционных PLM выходят далеко за пределы частной эффективности, приводя к большей экономии средств и росту доходов от продаж не только за счет внедрения инструментов и технологий, но и за счет необходимых жестких изменений в процессах и методах и возможности контроля над жизненным циклом продукта [5].

Задачи управления конструкторской документацией

Машиностроительное изделие представляет собой упорядоченную некоторым образом совокупность информационных и материальных объектов. Установленные между материальными объектами взаимосвязи определяют структуру изделия, соподчиненность деталей, сборочных единиц и других элементов. Конструкторская документация формируется в соответствии с этапами проектирования изделия, определенными стандартами единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Комплект конструкторской документации (ККД) представляет собой совокупность оформленных в ЕСКД документов, которые находятся в строгой соподчиненности между собой. Эта соподчиненность определяется структурой изделия, регламентированной ГОСТ 2.053-2006 [7].

Учитывая стадийность выполнения проекта, разнохарактерность конструкторских документов и сложность структуры их соподчиненности, мы можем сформулировать следующие основные функции и задачи управления подготовкой и сопровождением документации об изделии.

Функция организации архива документов с набором задач:

1. надежного хранения документов;
2. быстрого поиска документов;
3. выдачи и возврата документов;
4. восстановления их свойств при необходимости.

Функция отображения состава и структуры изделия с решением задач:

1. определения состава изделия;
2. формирования корректной структуры изделия;
3. минимизации ошибок при формировании документов;
4. минимизации ошибок во взаимосвязях между документами.



Функция управления изменениями документации с задачами:

1. управления версиями конструкторской документации;
2. определения порядка внесения изменений;
3. утверждения изменений документов;
4. отслеживания выпущенной документации и внесения изменений в неё.

Функция организации работ по проекту с задачами:

1. распределения работ и формирования корректных заданий исполнителям;
2. организации эффективного взаимодействия между исполнителями;
3. оперативного контроля состояния заданий по исполнителям и всего проекта в целом.

При обычном, так называемом «ручном», сопровождении на предприятиях, кроме конструкторских бюро, непосредственно занятых разработкой документации, создавались специальные службы, укомплектованные значительным штатом персонала, для решения вышеуказанных задач.

Современный потребительский рынок требует от промышленности возрастания частоты конструктивных и технологических усовершенствований и сменяемости изделий. А это в свою очередь приводит к необходимости быстро и корректно управлять постоянно растущими объемами конструкторской документации. На помощь в этих случаях приходят различного рода автоматизированные системы документооборота.

В мире на сегодняшний день насчитывается большое число автоматизированных систем документооборота для организации централизованного хранения и коллективной работы с неструктурированной информацией в виде сообщений (электронной почты и систем мгновенного обмена сообщениями) и документов (текстовых, структурированных в HTML и XML, электронных таблиц и т.п.). Такие системы получили название ECM (Enterprise content management). В России распространены системы БОСС-Референт, ЕВФРАТ-Документооборот, 1С:Архив, Cognitive Forms Network, Directum, DocsVision и ряд других.

Для управления комплектами конструкторской документации указанные выше системы не подходят в силу недостаточности функциональных возможностей для корректного управления технической документацией, имеющей широкий спектр форматов представления, а также довольно сложную систему постоянно меняющихся взаимных соподчиненностей.

При компьютеризированной подготовке носителем информации становится компьютерный файл. Итогом такой подготовки документации на сложное составное изделие будет некоторое количество файлов, эквивалентных количеству конструкторских документов. При этом возникает комплексная задача хранения и оборота конструкторских документов, представленных в виде файлов.

Функциональность PLM-систем

Несмотря на то, что, по существу, любая PLM-система зарождалась как инструмент для корректной организации технического документооборота с обеспечением информационной целостности процесса создания, производства и сопровождения продукта, диапазон функций охватывает ряд иных сфер, например, управление ресурсами в ходе выполнения проектов, управление портфелем продуктов, управление набором знаний и т.д. Фактически современные PLM-системы выступают в качестве информационного интегратора данных, процессов, специалистов и бизнес-систем [8; 9].

Из существующего многообразия программных продуктов, претендующих на роль PLM-систем, даже половину вряд ли можно отнести к таковым в чистом виде. Дело в том, что устремления значительной части разработчиков направлены на создание интегрированных систем управления предприятиями. Однако при отсутствии строгой теоретической базы системы, построенные с использованием похожих элементов, могут существенно отличаться не только в структурном, но и в функциональном плане. Это объясняется различиями в специфике деятельности конкретных предприятий, для которых формируются интегрированные системы.

Поэтому в ряде программных продуктов как зарубежных, так и отечественных разработчиков не всегда можно четко выделить PLM-системы, поскольку отдельные характерные для PLM элементы могут быть встроены в интегрированные системы корпоративного управления.

Например, интегрированное решение Lotsia PLM объединяет в себе и PDM и ERP системы. Другим примером служит специализированный программный продукт для производственных

предприятий TechnologiCS, включающий элемент для работы с составом изделий и электронным архивом документов (TechnologiCS-PDM) наряду с целым рядом модулей: модуль технологической подготовки производства (TechnologiCS-TPP); модуль складского учета (TechnologiCS-INV); модуль оперативного планирования и учета выполнения работ в цехах (на участках) (TechnologiCS-MAN); электронный архив и канцелярский документооборот (TechnologiCS-DOC).

Несмотря на то, что простые классификации не всегда точно соответствуют содержанию и многие программные продукты охватывают более одной области или не вписываются в одну категорию, можно выделить несколько обобщенных функций, характеризующих современную PLM-систему (подразумевается высокая степень детерминированности этих функций, поскольку речь идет об автоматизированных системах):

1. управление данными об изделиях (PDM), включающее настройку и управление архивами с контролируемым доступом, а также конфигурирование изделия и управление его составом;
2. управление жизненным циклом изделия (PLM) для обеспечения возможности внесения изменений в состав и структуру изделия с соблюдением его целостности и контроля над версиями изделия и выпущенными экземплярами документов;
3. управление потоком бизнес-процессов (Workflow) для обеспечения создания и редактирования процессов и схем согласования и утверждения документов;
4. управление проектами (Project Management), планирование и управление ресурсами проектов.

Заметим, что перечисленные функции во многом сходны с функциями управления техническим документооборотом, описанными выше.

Автоматизация управления конструкторской подготовкой на предприятии

Несмотря на широкое применение современных САД-систем в отечественном машиностроении, автоматизация управления конструкторской подготовкой для многих предприятий остается перспективой. С одной стороны, это объясняется сомнениями в возможности внедрения и осязаемом для высшего руководства экономическом эффекте при довольно значительных затратах. Поскольку рынок машиностроительной продукции в стране пока остается ненасыщенным, мало кто из руководителей решается на довольно серьезный шаг, связанный с внедрением PDM/PLM-систем.

В ОАО «Дальприбор» (г. Владивосток) еще в начале 2000-х гг. была выработана стратегия построения интегрированной системы автоматизации управления предприятием, предполагающая замену совершенно устаревшей на тот момент вычислительной техники персональными компьютерами, связанными в единую заводскую сеть.

Для формирования единой базы данных, содержащей исходную для работы всего предприятия конструкторскую и технологическую информацию, специалистами отдела информационных технологий был разработан ряд взаимосвязанных систем, включая PDM-систему «Dalpribor». Каждый исполнитель имел доступ к работе с составом и структурой (создание, корректировка и удаление) соответствующего узла. Пример интерфейса конструктора для работы с конфигурацией элемента изделия показан на рис. 1.

В качестве инструмента управления проектами руководителями конструкторских бюро и главными конструкторами использовался модуль формирования и корректировки основной структуры изделия с возможностью распределения работ по подразделениям и исполнителям. Внедрение этой системы обеспечило прямой доступ конструкторам к интегрированному информационному ядру предприятия, что позволило значительно сократить сроки подготовки документации, снизить количество ошибок и повысить оперативность внесения корректировок.

Используемая система обеспечивала хранение только одной версии состава и структуры изделия. С учетом постоянных корректировок система хранила только самую последнюю измененную версию. В процессе эксплуатации системы всё более остро ощущалась необходимость удовлетворения требований CALS-технологий по информационной поддержке объекта на всех этапах его жизненного цикла, а именно: управления версиями и хранения всей истории изменений, вносимых в каждую деталь-сборочную единицу (ДСЕ) или структурную схему.

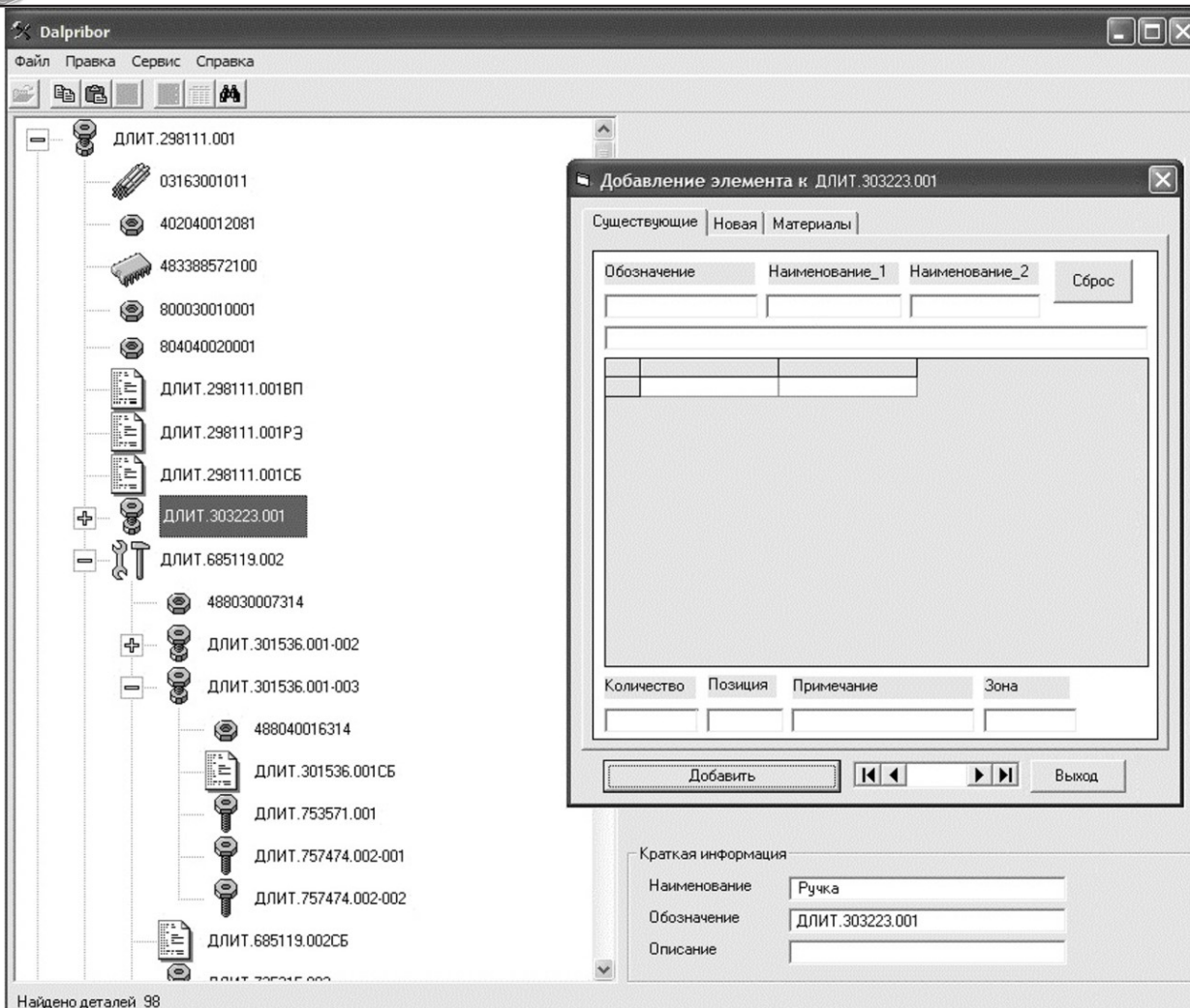


Рис. 1. Фрагмент интерфейса PDM системы «Dalpribor»

Для этих целей были рассмотрены и опробованы четыре варианта предлагаемых на рынке PLM-систем, в основном отечественные. По результатам опытной эксплуатации предпочтение было отдано PLM-системе Search, разработанной компанией Интермех (Белоруссия).

Принципы ведения конструкторской документации в PLM Search

В соответствии с ГОСТ 2.053-2013 любое изделие представляется составом и определенной структурой, характеризуемой двумя множествами: множеством элементов в виде ДСЕ и множеством отношений между этими элементами.

Базовыми элементами в PLM Search являются объекты и документы. Характерно, что в рассматриваемой системе основным элементом – «кирпичиком» проектируемого или изготавливаемого изделия – является объект. Под объектами понимаются любые сущности окружающего мира, которые могут иметь физическое воплощение или логическое представление. Примерами объектов могут служить здания, сооружения и др. Существует несколько типов объектов. Каждый тип объекта определяет набор параметров и набор связей с другими типами. Состав изделия представляется в виде множества (набора) объектов. Структура изделия, или его конфигурация, полностью определяется взаимосвязями между объектами в составе этого изделия.

В итоге задуманная и представленная разработчиком в PLM Search конфигурация в виде набора объектов различных типов и взаимоотношений между ними моделирует «скелет» (состав и структуру) изделия или его составную часть (см. рис. 2).

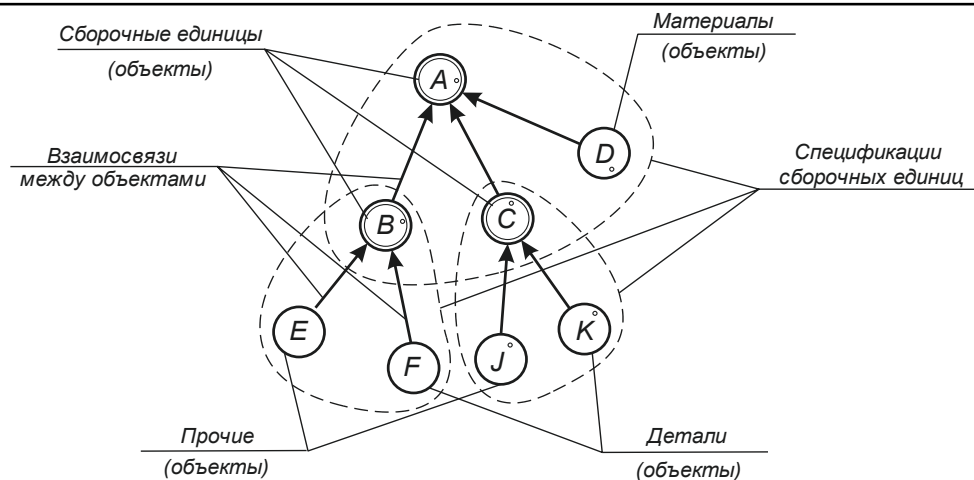


Рис. 2. Структура изделия в виде объектов и взаимосвязей

На рис. 3 показан пример различных форм визуализации состава и структуры изделия в системе Search. В пределах неизменности структуры изделия система предоставляет возможность сортировки объектов по типам, а также (при включении фильтрации) отображения структуры объектов только заданного типа.

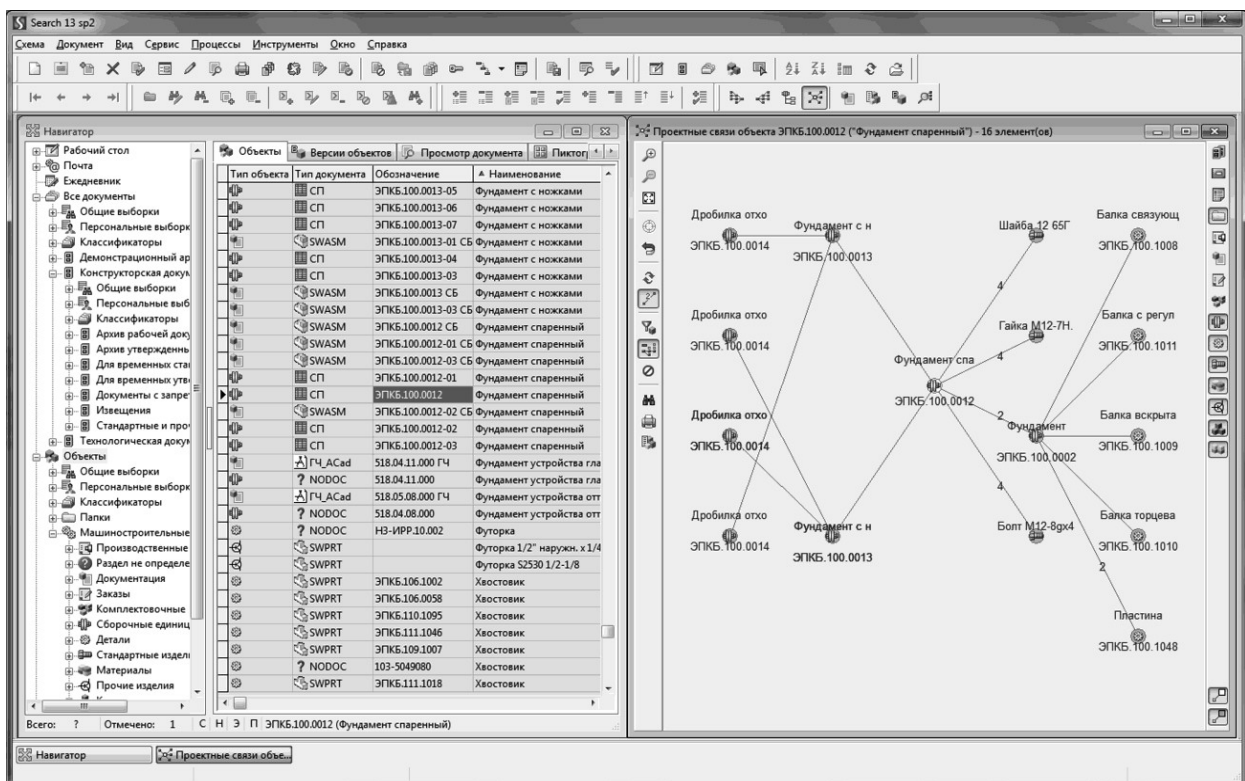


Рис. 3. Формы отображения состава и структуры изделия в виде объектов и взаимосвязей в Search

Параллельно с информацией об объектах, включая их схемы связей (структуры), используемых на предприятии, ведется архив документов с использованием картотеки. Элементом картотеки является карточка документа. Для различных по типу документов можно определить соответствующую структуру содержания карточек. Например, карточки чертежей проектной документации из архива проектных групп могут содержать информацию о наименовании объекта проектирования, а документы из архива канцелярии – входящие номера писем и адреса для ответов и т.д. Таким образом, карточка является элементом, связывающим объекты и конструкторские документы.

В ходе выполнения проекта формируются и «привязываются» к описываемым объектам конструкторские документы, которые конкретизируют геометрию и свойства этих объектов. Понятие документа ГОСТ 2.102-2013 регламентирует как зафиксированную на материальном носителе информацию, определяющую конструкцию изделия и обладающую признаками, позволяющими её идентифицировать. Конструкторский документ может храниться и передаваться в пространстве и времени и состоит из содержательной и реквизитной частей. Содержательная часть включает техническую информацию, ради передачи которой создан документ. Реквизитная часть включает сведения, по которым документ может быть идентифицирован и авторизован. Информация содержательной части документа хранится в файле, идентификационные параметры которого указаны в карточке.

Таким образом, для управления документами в PLM-системе для каждого объекта в структуре изделия в конечном итоге выстраивается цепочка объект ⇒ документ ⇒ файл. Связующим звеном между объектом и документом является карточка документа.

Пример визуализации связей объектов и документов на экране в PLM Search показан на рис. 4.

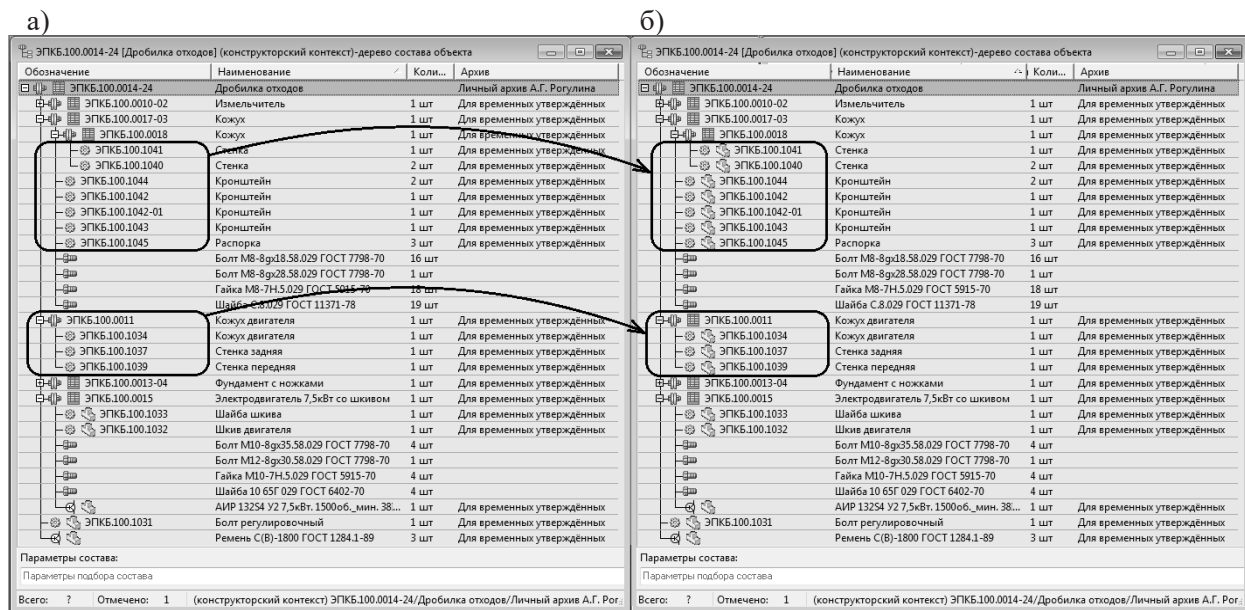


Рис. 4. Фрагмент изделия в PLM Search: а – структуры объекта; б – объекты с присоединенными документами

Управление изменениями в PLM Search

Самой важной отличительной особенностью PLM от PDM является наличие функционала управления изменениями и корректного хранения истории этих изменений, что позволяет получать сведения о текущем состоянии разрабатываемых или изготавливаемых изделий на любой момент времени в течение всего жизненного цикла.

В нашей стране для учета и отслеживания любых изменений в конструкторской документации разработан механизм, регламентируемый ГОСТ 2.503-2013. Этот механизм реализован средствами PLM Search. После утверждения конструкторских документов в системе Search они могут быть изменены только с помощью выпуска извещения об изменении. Таким образом, система контролирует не только выпуск конструкторских документов, но и их изменение. При этом в базе данных хранятся все версии конструкторских документов с извещениями на их изменения. Кроме того, имеется возможность указания актуальности версии на заданный период времени. Такой подход позволяет не только учитывать вновь внесенные изменения, но и дает возможность «откатиться» к предыдущей версии.

Для организации контроля разработанные конструкторские документы подлежат проверке и согласованию ответственными лицами. Порядок проверок и согласования зависит от особенно-

стей отрасли, предприятия и может отличаться на различных предприятиях, для разных типов документов, различных стадий разработки, разных проектов и т.д.

В системе имеется модуль управления потоком бизнес-процессов (Workflow), обеспечивающий автоматизированную передачу документов по цепочке проверок и согласований. Он позволяет гибко настраивать маршруты прохождения документов, последовательность сбора подписей, ответственные должности и обмен сообщениями. Таким образом, после завершения разработки документа конструктор инициирует процесс сбора подписей, запуская один из настроенных в системе маршрутов. Документ, отправленный по маршруту, отображается во входящем сообщении у пользователя, который был указан подписантом при настройке маршрута. Подписанный документ уходит по маршруту дальше, отклоненный с замечаниями возвращается на доработку в начало маршрута. Тем самым подобная организация работы позволяет контролировать сроки и качество разработки конструкторской документации, управлять работой проектной группы.

Организованная таким образом система документооборота позволяет выполнять широкий набор функций конструкторской подготовки производства, соответствующих PLM-системе и описанных выше.

Заключение

Сегодня в ПАО «Дальприбор» PLM Search является неотъемлемым элементом интегрированной информационной системы управления предприятием. Многолетняя эксплуатация этой системы показала её высокую надежность и эффективность при одновременном управлении разноплановыми проектами. Оперативный информационный обмен между конструкторами и технологами позволил сократить сроки разработки и освоения новых изделий и их модификаций. Благодаря использованию информационных технологий для оперативного и корректного отображения изменений в конструкторских документах и ведению электронной картотеки отпала необходимость наличия большого штата архивных служб.

С 2015 года PLM Search успешно эксплуатируется на предприятии ООО «Первое КБ» (г. Владивосток), занимающемся разработкой машиностроительных изделий и комплексов производственного назначения. Благодаря широким функциональным возможностям и простоте освоения наличие этой системы позволило наладить эффективное управление выполнением конструкторских разработок и оперативный обмен информацией между исполнителями.

Использование PLM-систем для автоматизации управления разработкой и сопровождением конструкторской документации на указанных предприятиях позволило не только повысить качество и снизить сроки конструкторской подготовки, но и перевести предприятия на принципиально новый уровень информационного обеспечения для взаимодействия всех служб предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лелюхин, В. Е. Принципиальная схема организации системы подготовки производства на машиностроительном предприятии / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Теория и практика в инновационных технологиях: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: ДВЦИТ, 2016. – С. 44-53.
2. Karniel, A. Managing the Dynamics of New Product Development Processes / A. Karniel, Y. Reich. – Springer-Verlag London Limited, 2011. – 257 p.
3. Лелюхин, В. Е. Интегрированная система конструкторско-технологической подготовки и управления производством на платформе 1С:УПП / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 34-38.
4. Saaksvuori, A. Product Lifecycle Management / A. Saaksvuori, A. Immonen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 254 p.
5. Teresko, J. The PLM Revolution [Электронный ресурс] / J. Teresko // IndustryWeek. 21 December 2004. – Режим доступа: <http://www.industryweek.com/companies-amp-executives/plm-revolution>.
6. Hirz, M. Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development: Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management / M. Hirz. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 466 p.
7. Peltonen, H. Concepts and an Implementation for Product Data Management / H. Peltonen // Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing. The Finnish Academies of Technology. – 2000. – № 105. – P. 188.
8. Kampffmeyer, U. ECM Enterprise Content Management / U. Kampffmeyer. – Hamburg. 2006. – 84 p.



Попова В. С., Соловьёв В. А.
V. S. Popova, V. A. Solovyev

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ СИНТЕЗА НЕЧЁТКОГО ИДЕНТИФИКАТОРА ПО ПРЯМЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE METHOD OF FUZZY IDENTIFIER SYNTHESIS USING DIRECT QUALITY INDICATORS

Соловьёв Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – Dr. habil. in Engineering, Professor, Head of the Department of Electro Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Попова Валерия Сергеевна – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: valeriya.guzhvina93@gmail.com.

Mrs. Valeriya S. Popova – Student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: valeriya.guzhvina93@gmail.com.

Аннотация. В статье разработана система нечёткой идентификации процесса ледообразования. Представлены настройка нечёткого регулятора, отрабатывающего зависимость интенсивности стекловидно-слоистого гололёда от температуры воздуха, настройка нечёткого регулятора, отрабатывающего зависимость интенсивности стекловидного гололёда от температуры воздуха.

Summary. The article describes the system of fuzzy identification of the process of ice formation. The authors present the configuration of a fuzzy regulator that fulfills the dependence of the intensity of vitreous-layered ice on the air temperature, adjustment of a fuzzy regulator that fulfills the dependence of the vitreous ice intensity on the air temperature.

Ключевые слова: ЛЭП, удаление гололёда, электродинамический способ, численный эксперимент, нечёткий идентификатор.

Key words: power line, ice removal, electrodynamic method, numerical experiment, fuzzy identifier.

УДК 004.942

Введение

Человечество всегда осознавало необходимость предугадывать будущее. Но особенно сильно роль прогнозирования увеличилась в наши дни при достаточно быстрых темпах развития общества, науки и техники, производства и производственных отношений. Для того чтобы эффективно бороться с образованием гололёда на проводах ЛЭП, необходимо использовать системы прогнозирования гололёдообразования.

В последние годы новые методы метеомоделирования и прогнозирования атмосферных процессов позволяют с более высокой точностью и достоверностью оценивать как количественные параметры уже сформировавшихся гололедных отложений, так и ожидаемые свойства отложений льда на поверхностях различных объектов. Важным аспектом этих разработок является возможность интеграции моделей локального масштаба с глобальными системами метеорологического прогнозирования. Эффекта удалось достичь путем создания ряда переходных элементов моделирования, что позволило преодолеть технические сложности резкого перехода от глобальных моделей к локальному моделированию с масштабами в несколько сотен метров. Эти достижения имеют большое практическое значение, поскольку более раннее предупреждение о гололедной

опасности позволяет подготовить и реализовать ряд превентивных мер, направленных на уменьшение отрицательных последствий гололедообразования на ВЛ.

На сегодняшний день системы прогнозирования ледообразования разработаны в основном только для авиационной техники. Прямое использование таких систем применительно к проводам ЛЭП невозможно в связи с резко отличающимися атмосферными условиями и параметрами объекта. Поэтому задача разработки модуля прогнозирования процесса гололедообразования на проводах ЛЭП является востребованной.

Анализ технических источников по тематике ледообразования указывает на недостаток информации, отражающей выявление аналитических закономерностей ледообразования в зависимости от важнейших параметров: температуры, влажности, скорости ветра, погодных условий и т.д. Поэтому на сегодняшний день не существует подхода к математическому описанию образования ледяного покрова на проводах ЛЭП. В ряде источников за основу берётся ограниченное количество параметров, которые принимаются субъективно за важнейшие и на базе них по экспериментальным и эмпирическим зависимостям делается попытка создания математических моделей отложений льда на проводах ЛЭП.

Так как необходимые для создания математической модели данные весьма ограничены и определяются в основном качественно, то напрашивается решение осуществить поиск зависимостей путём реализации интеллектуальных блоков. Например, с использованием нечёткой логики.

Разработка нечёткого идентификатора

В качестве примера рассмотрим зависимость интенсивности стекловидно-слоистого гололёда от температуры воздуха. Настроим нечёткий регулятор на основании данных табл. 1.

Таблица 1
 Зависимость интенсивности стекловидно-слоистого гололёда от температуры воздуха [2]
 в процентах

Температура		Интенсивность, мм		
от	до	Слабая (6...8)	Умеренная (9...16)	Сильная (>17)
0	-1	18	47	35
-2	-3	24	57	19
-4	-5	33	67	0
-6	-7	0	100	0

В качестве алгоритма нечеткого логического вывода выберем алгоритм Сугено как наиболее интуитивно доступный для составления базы правил. Функциональная схема регулятора приведена на рис. 1. При разработке прогнозирующего модуля будем учитывать 2 основных входных параметра, которые представлены в таблице: температура воздуха и интенсивность отложений льда в миллиметрах. В качестве выходных параметров используем интенсивность ледообразования в процентах.

На рис. 2...4 приведены экранные формы, отражающие распределение нечетких термов входных и выходной переменных (рис. 2 соответствует первой входной переменной, рис. 3 – второй входной переменной, рис. 4 – выходной переменной).

Диапазон значений входной переменной «температура» $-7...0$ °С. Переменная содержит 4 нечетких терма, описывающих диапазоны температур, при которых происходит образование гололёда. Каждый терм соответствует температурному диапазону табл. 1.

Диапазон значений второй входной переменной – $6...30$ мм.

Входная переменная «интенсивность (в мм)» содержит три терма, описывающих слабую (6...8), умеренную (9...16) и сильную (>17) интенсивность гололедообразования.

База правил, характеризующая формирование выходной переменной, показана на рис. 5. Каждая из трех выходных переменных содержит по четыре нечетких терма, значения которых соответствуют табл. 1.

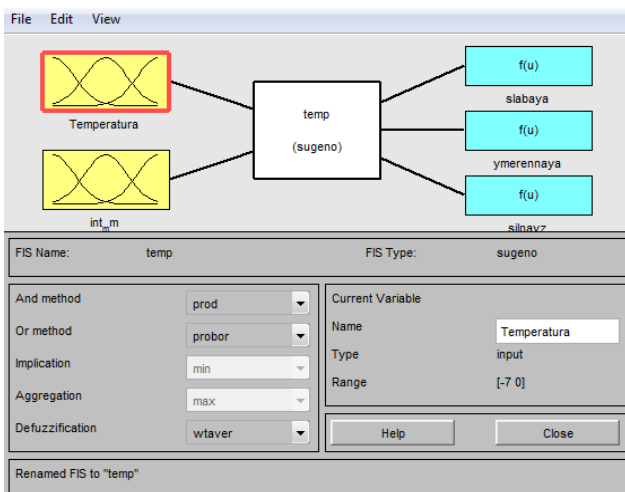


Рис. 1. Функциональная схема полученного нечёткого прогнозирующего модуля

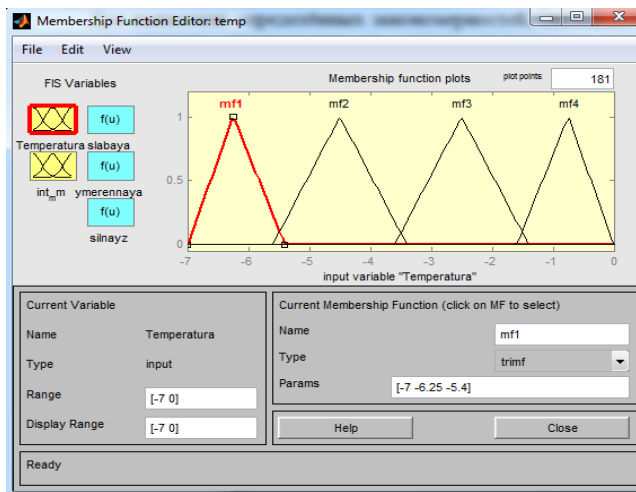


Рис. 2. Распределение нечётких термов первой входной переменной

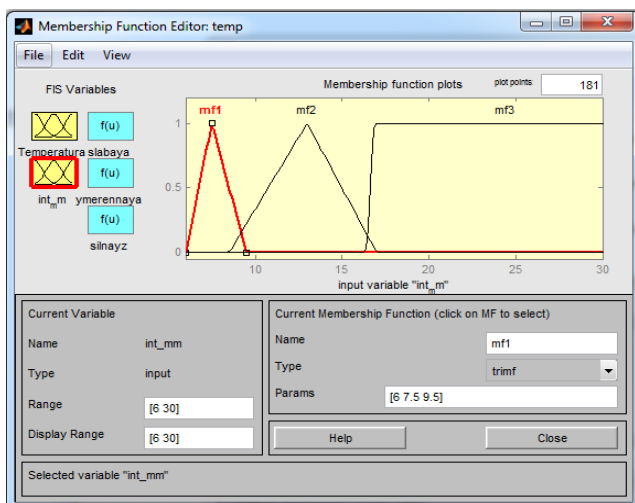


Рис. 3. Распределение нечётких термов второй входной переменной

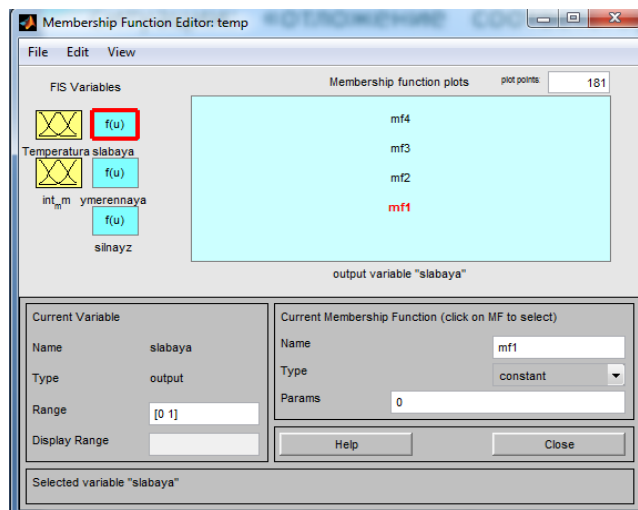


Рис. 4. Распределение нечётких термов первой выходной переменной

1. If (Temperatura is mf1) and (int_mm is mf1) then (slabaya is mf1) (1)
2. If (Temperatura is mf2) and (int_mm is mf1) then (slabaya is mf2) (1)
3. If (Temperatura is mf3) and (int_mm is mf1) then (slabaya is mf3) (1)
4. If (Temperatura is mf4) and (int_mm is mf1) then (slabaya is mf4) (1)
5. If (Temperatura is mf1) and (int_mm is mf2) then (ymerennaya is mf1) (1)
6. If (Temperatura is mf2) and (int_mm is mf2) then (ymerennaya is mf2) (1)
7. If (Temperatura is mf3) and (int_mm is mf2) then (ymerennaya is mf3) (1)
8. If (Temperatura is mf4) and (int_mm is mf2) then (ymerennaya is mf4) (1)
9. If (Temperatura is mf1) and (int_mm is mf3) then (silnaysz is mf1) (1)
10. If (Temperatura is mf2) and (int_mm is mf3) then (silnaysz is mf2) (1)
11. If (Temperatura is mf3) and (int_mm is mf3) then (silnaysz is mf3) (1)
12. If (Temperatura is mf4) and (int_mm is mf3) then (silnaysz is mf4) (1)

Рис. 5. База правил полученного нечеткого прогнозирующего модуля, связывающая набор входных и выходных параметров

Проверим базу правил на модели, представленной на рис. 6.

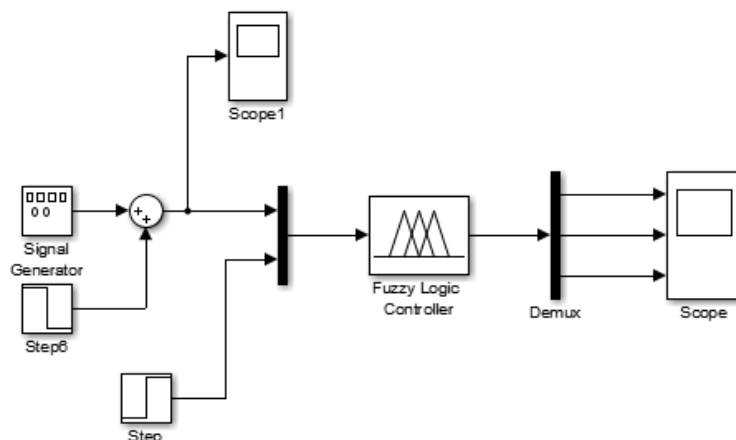


Рис. 6. Функциональная схема системы с нечётким регулятором

Чтобы проверить адекватность составленной модели, подадим на вход «температура» пилообразный сигнал с частотой 0,1 Гц, амплитудой 3,5, вид которого приведен на рис. 7. На вход «интенсивность» подадим ступенчатый сигнал, равный 7, что соответствует слабой интенсивности. В таком случае будет задействован выход № 1. Результат реакции системы приведен на рис. 8.

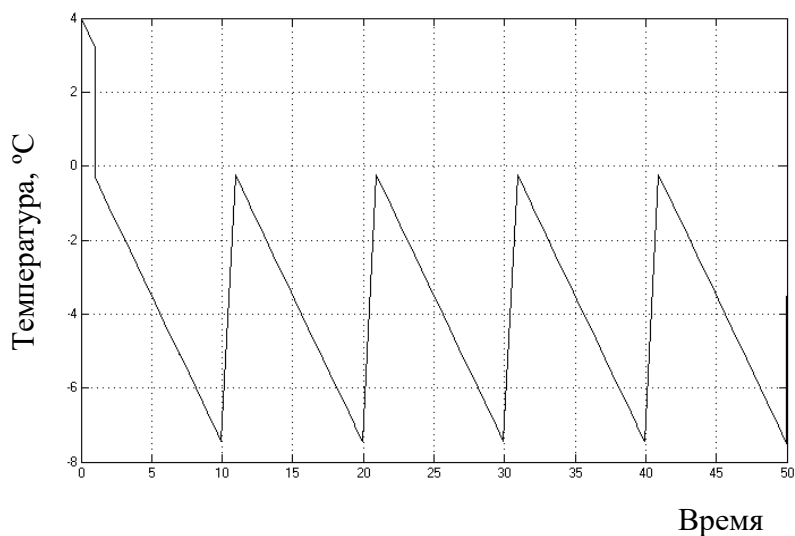


Рис. 7. Сигнал, поданный на вход первой входной переменной нечёткого регулятора

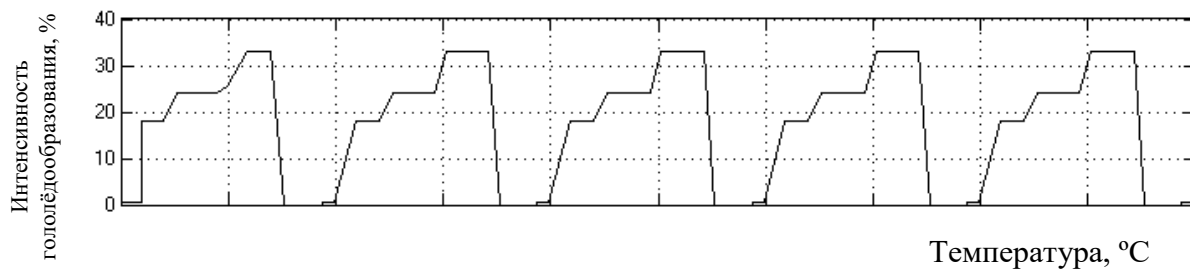


Рис. 8. График переходного процесса при входном сигнале с частотой в 0,1 Гц

Как видно из рис. 8, регулятор практически полностью обрабатывает все табличные значения. Изменим частоту на 0,01 Гц, затем на 1 Гц. Результаты реакции системы приведены на рис. 9 и 10.

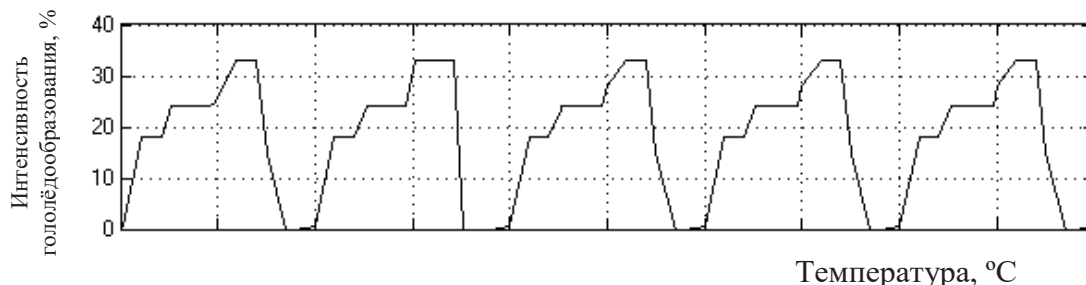


Рис. 9. График переходного процесса при входном сигнале с частотой в 0,01 Гц

Как видно из рис. 9 и 10, форма сигнала, координаты основных точек, а также долевое участие рабочей зоны не изменились.

Исследуем второй выход. Подадим на вход «интенсивность» ступенчатый сигнал, равный 13, что соответствует умеренной интенсивности. Результаты сведём в табл. 2.

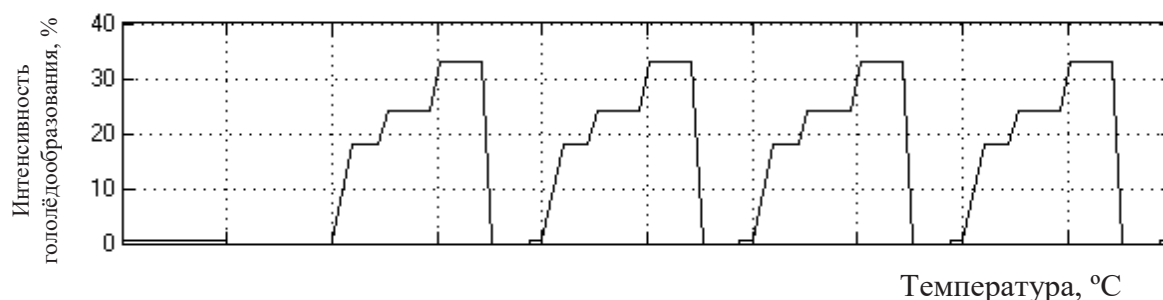


Рис. 10. График переходного процесса при входном сигнале с частотой в 1 Гц

Таблица 2

Долевое участие рабочей зоны в зависимости от частоты

в процентах

Интенсивность, мм	Частота, Гц		
	1	0,1	0,01
47	10	10	11
57	23	23	24
67	15	16	15
100	18	20	18

Исследуем третий выход. Подадим на вход «интенсивность» ступенчатый сигнал, равный 20, что соответствует сильной интенсивности. Результаты сведём в табл. 3.

Вывод: при изменении частоты графики остаются адекватными и выходят на изначально заданные значения. Система работает адекватно, задействует правильные выходы при различных значениях второй входной переменной. Долевое участие рабочей зоны для каждого графика практически не изменяется.

Таблица 3

Долевое участие рабочей зоны «сильная интенсивность» в зависимости от частоты в процентах

Интенсивность, мм	Частота, Гц		
	1	0,1	0,01
35	10	10	11
19	20	22	21
0	50	50	50

При произвольно выбранном распределении термов, как видно из графиков (см. рис. 8...10), выходная величина выходит на заданные значения ступенчато. В реальных условиях резкого изменения входных параметров происходить не может, т.е. переход от одного фиксированного значения на другое должен происходить плавнее. Задачи нечёткого идентификатора должны включать в себя функцию исключения влияния темпа входного воздействия. Это можно осуществить путём повышения интеллектуальных свойств идентификатора, например, рациональным изменением функций принадлежности. Для этого изменим распределение термов первой входной переменной «температура». При этом изменение будем производить в сторону увеличения их интенсивности в районе диапазона температур $-2...-5$ °С. Варианты такой коррекции показаны на рис. 11...13.

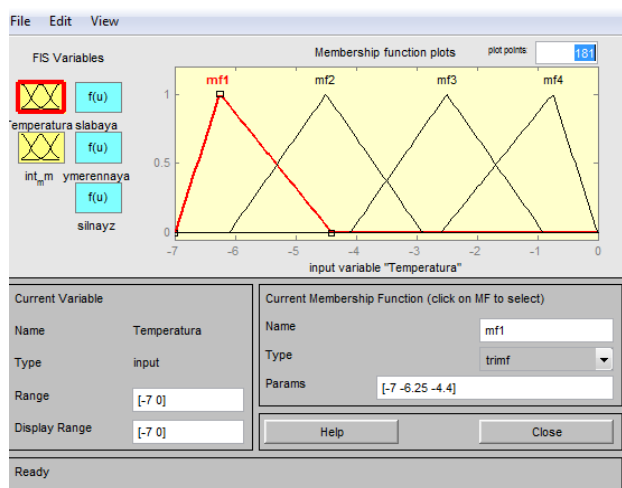


Рис. 11. Распределение нечётких термов первой входной переменной (вариант 2)

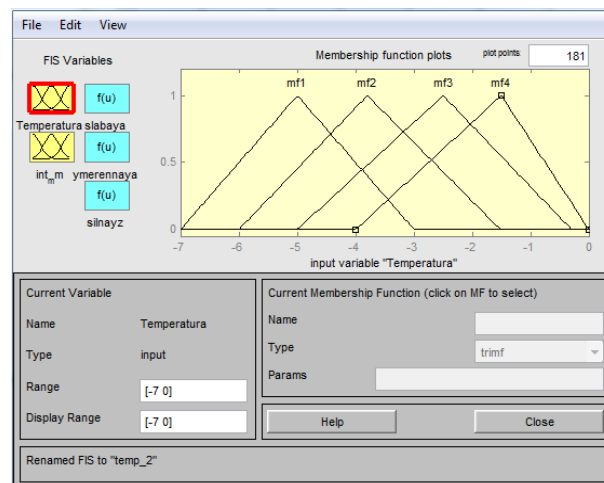


Рис. 12. Распределение нечётких термов первой входной переменной (вариант 3)

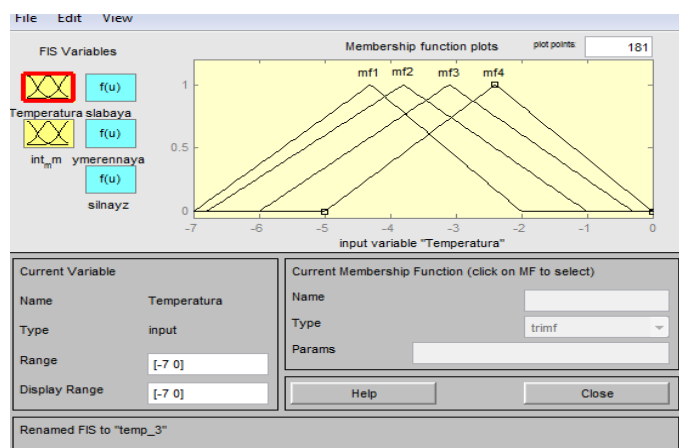


Рис. 13. Распределение нечётких термов первой входной переменной (вариант 4)



Систематизированные результаты реакции системы для рассмотренных вариантов распределения нечетких термов входа «температура» приведены в табл. 4...6.

Таблица 4

Долевое участие рабочей зоны в зависимости от распределения нечетких термов для второго варианта

в процентах

Интенсивность, мм (слабая – 7)	Вариант распределения термов			
	1	2	3	4
18	10	7	Значения рабочей зоны не соответствуют заданным в таблице	
24	20	6		
33	20	3		
0	23	20		

Таблица 5

Долевое участие рабочей зоны в зависимости от распределения нечетких термов для третьего варианта

в процентах

Интенсивность, мм (умеренная – 13)	Вариант распределения термов			
	1	2	3	4
47	10	7	10	Значения рабочей зоны не соответствуют заданным в таблице
57	23	5	3	
67	15	3	3	
100	18	3	10	

Таблица 6

Долевое участие рабочей зоны в зависимости от распределения нечетких термов для четвертого варианта

в процентах

Интенсивность, мм (сильная – 20)	Вариант распределения термов			
	1	2	3	4
35	10	2	Значения рабочей зоны не соответствуют заданным в таблице	
19	20	2		
0	50	32		

Вывод: наиболее подходящим и адекватным является второй вариант настройки регулятора, т.к. третий и четвертый не обеспечивают выход графика переходного процесса на заранее заданные табличные величины, а у первого варианта настройки чрезмерно долевое участие рабочей зоны, равной 0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков, С. И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьёв, К. Е. Костин // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3(41). – С. 148-158.
2. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В. Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.
3. Бургсдорф, В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды ГГО. – 1947. – Вып. 3. – С. 3-12.

4. Нечёткое управление системами автоматизированного электропривода / В. А. Соловьёв, А. Г. Владыко, В. И. Суздорф, С. П. Черный // Электромеханические преобразователи энергии: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2001. – С. 79-80.
5. Соловьёв, В. А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества / В. А. Соловьёв, А. В. Кончин // Сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – С. 55-59.
6. Дьяков, А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 161 с.
7. Засыпкин, А. С. Интегральная оценка эффективности схем плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 42-45.
8. Мазин, И. П. Физические основы обледенения самолетов / И. П. Мазин. – М.: Гидрометеиздат, 1957. – 120 с.



Черный С. П., Бузикаева А. В., Полей Е. О., Чжо Мин У
S. P. Cherny, A. V. Buzikaeva, E. O. Poley, Kyaw Minn Oo

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

ANALYSIS OF INFLUENCE OF CONTROL OBJECT PARAMETERS ON THE BASIC CHARACTERISTICS OF THE FUZZY REGULATOR

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Cherny Sergey Petrovich – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electro-Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Бузикаева Алина Валерьевна – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Buzikaeva Alina Valerievna – Student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Полей Евгений Олегович – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Poley Evgeny Olegovich – Student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Чжо Мин У – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Kyaw Minn Oo – Student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлен анализ влияния параметров объекта регулирования на основные характеристики и настройки нечетких логических регуляторов. Основное влияние параметров объекта связано с изменением характеристик блока дефаззификации, при этом простота коррекции нечеткой системы будет обусловлена выбранным алгоритмом нечеткого логического вывода.

Summary. The paper presents an analysis of the influence of control object parameters on the main characteristics and settings of fuzzy logic controllers. The main influence of the parameters of the object is related to the change in the characteristics of the defuzzification block, while the simplicity of correction of the fuzzy system will be conditioned by the chosen algorithm of fuzzy logic inference.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечеткий логический регулятор, вариация параметров системы управления.

Key words: intelligent control system, fuzzy logic controller, variation of control system parameters.

УДК 681.5.01:658.5

Введение

В настоящее время системы управления, разрабатываемые или дополняемые нечеткой логикой, развиваются с высокой скоростью. Это связано с тем, что системы управления, содержащие элементы нечеткой логики, позволяют реализовывать различные сложные законы регулирования в тех случаях, когда стандартные вычислительные алгоритмы либо не применимы из-за значительных неопределенностей, либо существенно ограничены. Актуальность такой технологии заключа-

ется в тенденции увеличения сложности математических моделей реальных систем, в способности системы оперировать информацией в качественной форме, а также в формализации процессов управления, связанной с повышением их адекватности и учетом все большего числа различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений [1].

В данной работе будет рассмотрен анализ нечетких регуляторов, построенных с использованием алгоритмов Мамдани и Сугено при недетерминированном изменении внутренних параметров самой интеллектуальной системы автоматического управления.

Для анализа влияния основных параметров объекта регулирования на интеллектуальную систему будет использована модель электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием, представленная на рис. 1.

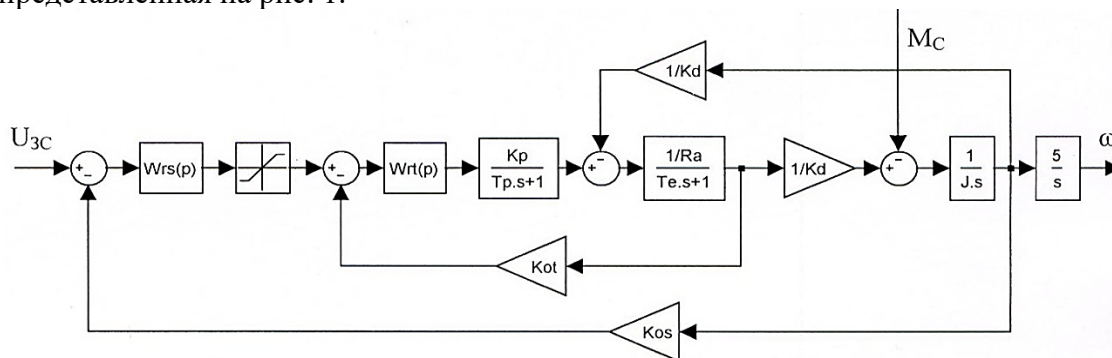


Рис. 1. Структурная схема электропривода с подчиненным регулированием тока и скорости

На базе модели системы управления, показанной на рис. 1, производится моделирование интеллектуальной системы с использованием нечеткого подхода, в которой производится замена классического регулятора на нечеткий (см. рис. 2).

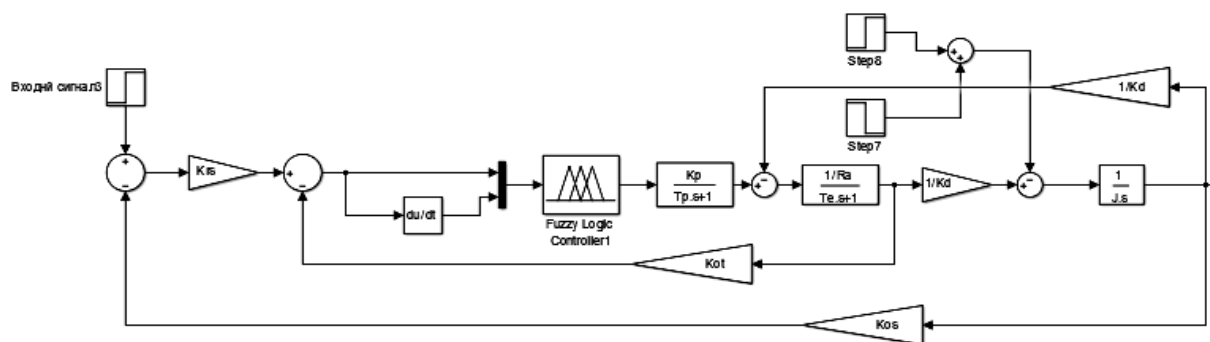


Рис. 2. Модель электропривода постоянного тока с нечетким регулятором

Нечеткий логический регулятор анализирует сигнал ошибки и его производную, и, соответственно, имеет на своем входе две лингвистические переменные input1 и input2 и одну лингвистическую переменную на выходе – output1. Функционирование регулятора осуществляется с применением основных алгоритмов нечеткого логического вывода Сугено или Мамдани [2].

Рассмотрим подробнее моделирование нечеткой системы с алгоритмом вывода Сугено. Лингвистические переменные input1 и input2 формализуют понятия первого и второго входных сигналов нечеткого регулятора – сигнал ошибки по току и скорость изменения ошибки по току соответственно. Выбор диапазона области определения лингвистических переменных производится по переходному процессу системы с классическим регулятором. В области определения базового терм-множества лингвистической переменной распределены пять аппроксимированных функций принадлежности нечетких переменных треугольного вида.

Лингвистическая переменная $output1$ формализует понятие выходного сигнала нечеткого регулятора. В области определения базового терм-множества лингвистической переменной также распределены пять аппроксимированных функций принадлежности нечетких переменных треугольного вида [3; 4].

Нечеткая продукционная база знаний нечеткого логического регулятора представляет собой перечень из семи правил и представлена на рис. 3.

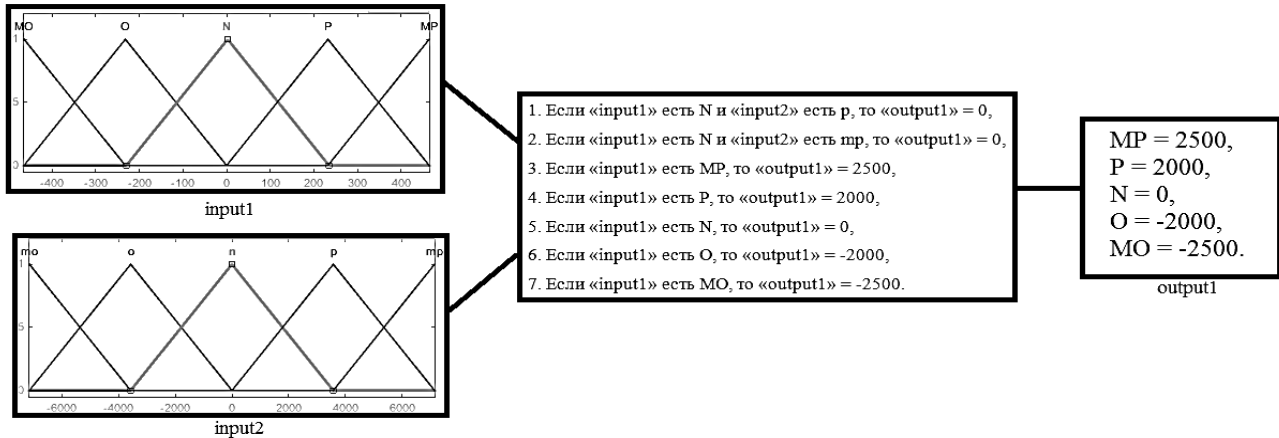


Рис. 3. Функциональная схема нечеткой системы с алгоритмом вывода Сугено

В процессе моделирования был получен график переходных процессов системы с классическим и нечетким регуляторами (см. рис. 4). Из графика видно, что основным достоинством систем с нечетким логическим регулятором является отсутствие перерегулирования и незначительное увеличение быстродействия.

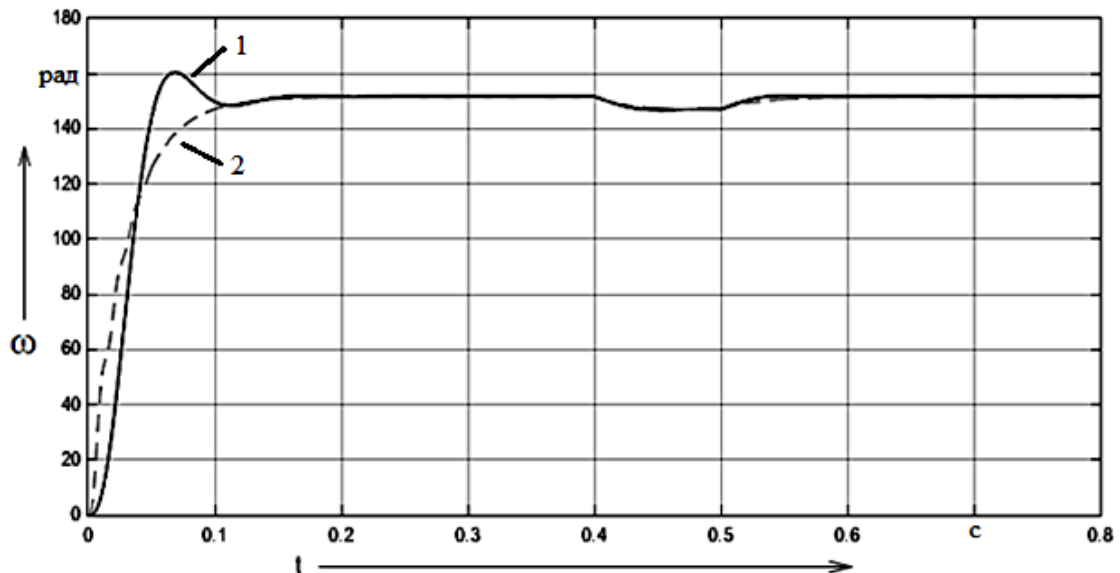


Рис. 4. Переходный процесс системы с классическим и нечетким регулятором с алгоритмом вывода Сугено: 1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором

Аналогичным образом производится синтез нечеткой системы с алгоритмом вывода Мамдани.

Путем изменения параметров объекта управления, а именно увеличения коэффициента усиления тиристорного преобразователя (K_p) и постоянной времени тиристорного преобразователя (T_p) на 20 % и на 40 %, была произведена модернизация системы управления электроприводом

постоянного тока. Более наглядную форму переходных процессов отражает 40%-е изменение параметров системы; 20%-е является лишь итерационной составляющей процесса моделирования [5; 6].

Подробнее рассмотрим изменение параметров объекта управления путем увеличения на 40 % нечеткой системы управления с алгоритмом вывода Сугено. При увеличении параметров тиристорного преобразователя замечены изменения характера в переходных характеристиках системы (см. рис. 5): в статическом режиме заметны небольшие отклонения.

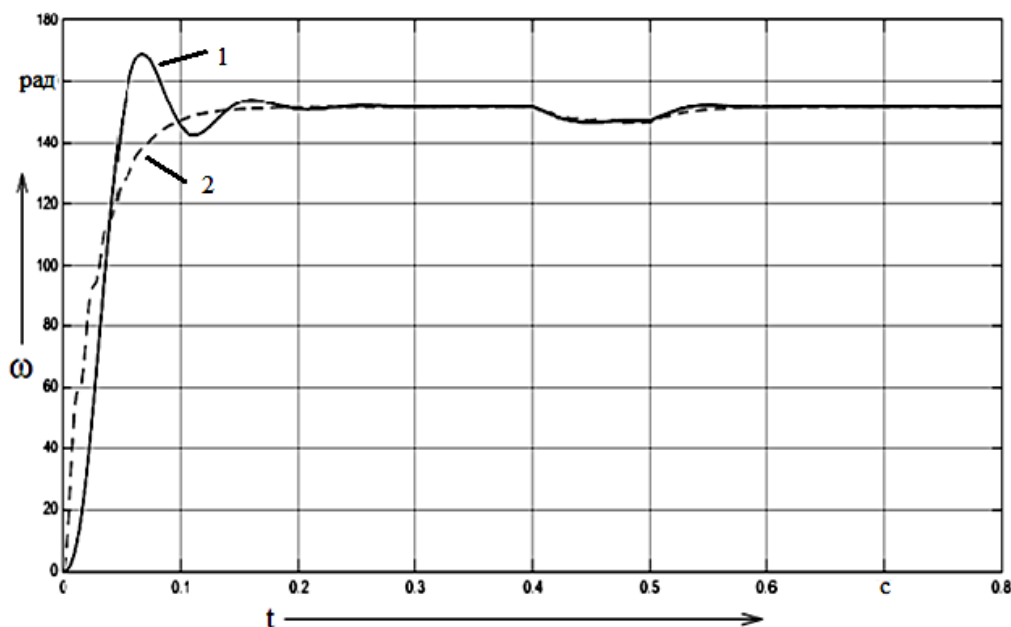


Рис. 5. Переходная характеристика по току при изменении параметров объекта управления на 40 %: 1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором с алгоритмом вывода Сугено

Чтобы повысить точность системы, необходимо осуществить коррекцию параметров нечеткого логического регулятора для получения переходной характеристики системы исходного вида. Для этого была проведена коррекция выходных констант для упрощенного алгоритма нечеткого вывода Сугено (см. рис. 6).

Подобным образом выполняется модернизация системы с алгоритмом вывода Мамдани.

Анализ изменений параметров функции принадлежности базового терм-множества выходной лингвистической переменной с учетом необходимой коррекции на вариацию коэффициента усиления и постоянной времени тиристорного преобразователя показывает, что существенное влияние на качество переходных характеристик системы и нечеткого регулятора в целом оказывает нечеткая переменная «Р» базового терм-множества (что представлено в табл. 1). Уменьшение этого параметра позволяет вернуть основные характеристики системы управления к исходному виду.

Аналогично была исследована нечеткая система управления с алгоритмом вывода Мамдани (см. табл. 2).

Для данного случая наибольшее влияние на качество переходных характеристик системы оказывает распределение функций принадлежности в заданном диапазоне регулирования. Существенные изменения этого диапазона связаны с более точной настройкой системы в ее статическом режиме, что согласуется с результатами анализа системы, настроенной с помощью алгоритма нечеткого логического вывода Сугено.

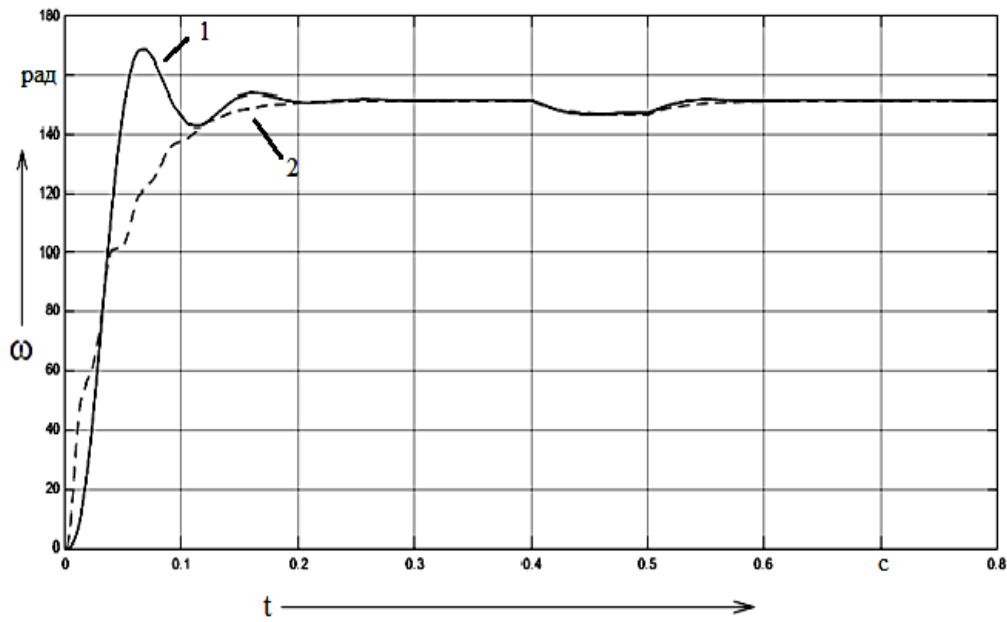


Рис. 6. Переходная характеристика по току скорректированной системы: 1 – система с классическим регулятором; 2 – система с измененными параметрами в нечетком регуляторе с алгоритмом вывода Сугено

Таблица 1

Изменения параметров функции принадлежности выходной лингвистической переменной системы управления с алгоритмом вывода Сугено

Переменная	MP	P	N	O	MO
Номинальные значения ($K_p = 33,75$; $T_p = 0,007$)	2500	2000	0	-2000	-2500
+20 % ($K_p = 40,5$; $T_p = 0,0084$)	2300	550	5	-2500	-3000
+40 % ($K_p = 47,25$; $T_p = 0,0098$)	2400	280	4	-2500	-2800

Таблица 2

Изменения параметров функции принадлежности выходной лингвистической переменной системы управления с алгоритмом вывода Мамдани

Переменная	MP	P	N	O	MO
Номинальные значения ($K_p = 33,75$; $T_p = 0,007$)	[1250 2500 3750]	[0 2000 2500]	[-1250 0 1250]	[-2500 -2000 0]	[-3750 -2500 -1250]
+20 % ($K_p = 40,5$; $T_p = 0,0084$)	[9 150 4800]	[0.6 10 210]	[-10 0 10]	[-210 -10 -0.6]	[-180 -150 -9]
+40 % ($K_p = 47,25$; $T_p = 0,0098$)	[6,25 65 2003]	[2,75 6,667 90]	[-1,667 2,5 6,667]	[-85 -1,667 2,25]	[-72,5 -60 -1,25]

Анализ показал, что изменение основных параметров нечеткого логического регулятора от номинальных значений K_p и T_p до 40 % оказывает существенное влияние на качество динамиче-

ских характеристик системы. Для ее возврата в исходное состояние, согласно предъявляемым требованиям, необходимо нелинейно сужать диапазон распределения функций принадлежности выходной лингвистической переменной.

Подводя итог, мы должны отметить, что регуляторы, построенные с использованием классических методов, не обладают необходимой гибкостью, особенно при внедрении в систему недетерминированных возмущающих воздействий. Главным достоинством интеллектуальной системы управления является ее гибкость и робастность к целому ряду как внешних, так и внутренних воздействий. Вместе с тем робастные свойства нечеткого регулятора ограничены некоторым пределом, что влечет за собой необходимость более точной настройки при изменении внутренних параметров объекта регулирования. Данное исследование позволит в дальнейшем реализовывать процедуры по адаптивной настройке подобного класса интеллектуальных систем.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечеткого регулятора для систем управления тепловыми процессами / Е. П. Иванкова, В. Г. Косицын, В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Информатика и системы управления. – 2003. – № 1(5). – С. 73-82.
- 2 Соловьев, В. А. Многокаскадные нечеткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Черный, А. И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 45-51.
- 3 Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 280 с.
- 4 Черный, С. П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, А. А. Гусаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 24-30.
- 5 Черный, С. П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, Д. А. Новак // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4 (28). – С. 56-60.
- 6 Cherny, S. P. Another approach to enhancement of fuzzy controller intellectual capabilities / S. P. Cherny, V. A. Solovyev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Xplore Conference Publications. – 2017. – P. 1-4.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Сысоев О. Е., Добрышкин А. Ю., Нейн Сит Наинг
O. E. Sysoev, A. Yu. Dobryshkin, Nyein Sit Naing

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАМКНУТОГО КОЛЬЦА
ПРИ МЕСТНОМ НАГРЕВЕ**

**RESEARCH OF OWN VIBRATIONS AND VAT OF THE CLOSED RING IN LOCAL
HEATING**

Сысоев Олег Евгеньевич – декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Oleg E. Sysoev – Dean of Cadastre and Construction Faculty, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Добрышкин Артем Юрьевич – старший преподаватель кафедры строительства и архитектуры Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Artem Yu. Dobryshkin – Senior Lecturer, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Нейн Сит Наинг – аспирант кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Республика Союз Мьянма).

Mr. Nyein Sit Naing – a Post-Graduate Student, Department «Mechanics and Analysis of Structures and Processes», Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Republic of the Union of Myanmar).

Аннотация. При проектировании и строительстве зданий и сооружений часто используются силовые элементы в виде кольца, которые в процессе эксплуатации испытывают местный нагрев более 100 °С. Такие воздействия на конструкционные элементы вызывают изменение напряженно-деформированного состояния, а также влекут местное изменение модуля упругости, что заметно сказывается на численных величинах колебаний кольца. Неверный расчет такого рода элементов может привести к излишним деформациям либо к разрушению элемента и конструкции в целом. В данной статье представлено исследование собственных колебаний кольца при местном нагреве. С помощью метода конечных элементов кольцо было разбито на 18 конечных элементов, физические модульные характеристики которых изучены. Проведен анализ каждого конечного элемента кольца, его влияния на собственные колебания, построена математическая модель колебаний. Затем получена система связанных динамических (модальных) уравнений относительно безразмерных амплитуд колебаний.

Summary. In the design and construction of buildings and structures, the use of force elements in the form of rings, which during the operation experience local heating of more than 100 °C. Such effects on structural elements cause a change in the stress-strain state, as well as a local change in the modulus of elasticity, which significantly affects the numerical values of the oscillations of the ring. An incorrect calculation of such elements can lead to excessive deformations or to the destruction of the element and the structure as a whole. In this paper, we study the natural vibrations of a ring with local heating. Using the finite element method, the ring was divided into 18 finite elements, the physical modular characteristics of which were studied. Analysis of each finite element of the ring, its influence on natural oscillations, a mathematical model of oscillations is constructed. Then a system of coupled dynamical (modal) equations with respect to the dimensionless oscillation amplitudes is obtained.

Ключевые слова: кольцо, колебания, температурные деформации.

Key words: ring, vibrations, temperature strain.

УДК 624.074.434

Многие здания и сооружения имеют цилиндрическую форму, в основе конструкции которых лежит силовой элемент – кольцо (рёбра жёсткости, шпангоуты и т.п.), при этом на строительные объекты воздействует неравномерный градиент температур. Поэтому исследование

свободных и вынужденных колебаний замкнутого кольца при изменении температур имеет важное значение. При нагреве кольца с одной стороны происходит постепенное перераспределение температур и теплоты к противоположной стороне кольца, одновременно происходит изменение модуля упругости конструкционного материала по телу кольца [1 – 4].

Для проведения исследования кольца при термических воздействиях использовалась лабораторная база ФГБОУ ВПО «КНАГУ» [5], для этого кольцо условно разделили на 18 конечных элементов (см. рис. 1).

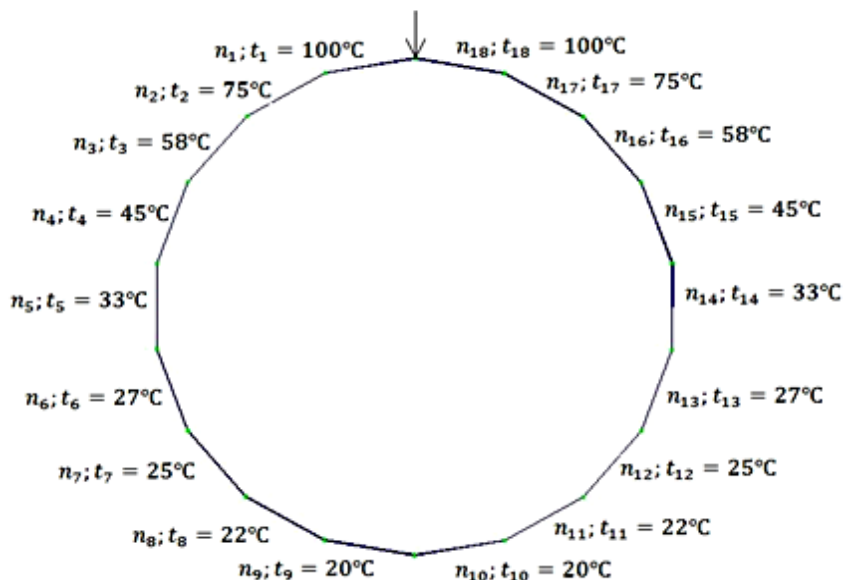


Рис. 1. Изменение градиента температур по телу кольца

Температура конечных элементов изменяется по следующему закону:

$$T = -38,2 \ln(n) + 99,$$

где n – конечный элемент (см. рис. 2). Измерение температуры проводилось при помощи измерителя температуры 320-EN-00.

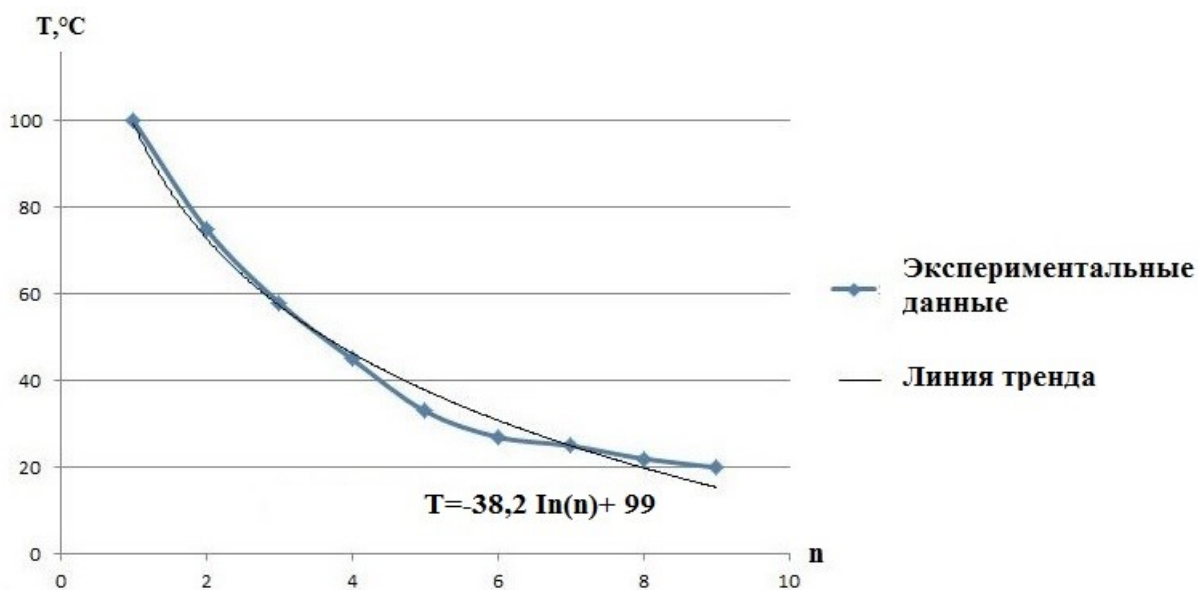


Рис. 2. Функция изменения температуры по конечным элементам кольца

Модуль упругости каждого элемента материала кольца изменялся в зависимости от температуры (см. рис. 3) [6], что приводило к различным деформациям конечных элементов (рис. 4).

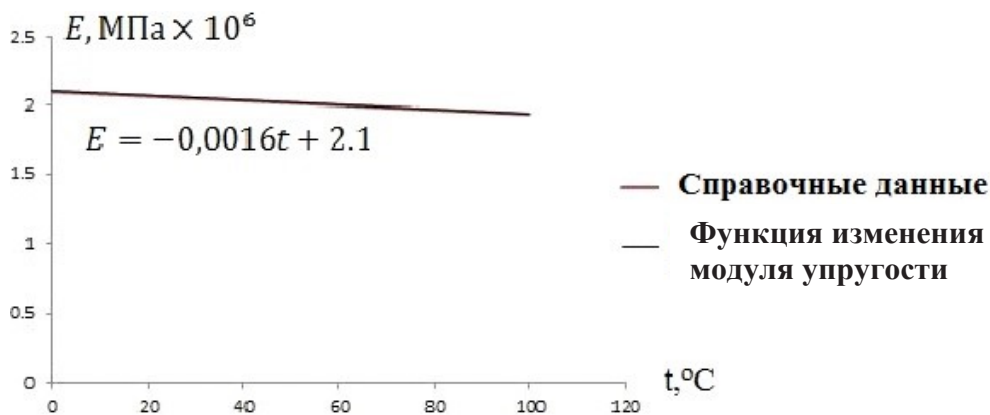


Рис. 3. Зависимость модуля упругости стали 20 от температуры

При этом изменится форма кольца и его напряженно-деформированное состояние (НДС) (см. табл. 1).

Таблица 1

Характеристики конечных элементов кольца

Номер элемента, n	1, 18	2, 17	3, 16	4, 15	5, 14	6, 13	7, 12	8, 11	9, 10
$t_n, ^\circ\text{C}$	100	75	58	45	33	27	25	22	20
$dt, ^\circ\text{C}$	80	55	38	25	13	7	5	2	0
$E, \text{кг/мм}^2$	19 720	20 120	20 392	20 600	20 792	20 888	20 920	20 968	21 000
$\Delta L, \text{мм}$	0,033	0,023	0,015	0,01	0,005	0,003	0,002	0,001	0,0005
ε	0,094	0,072	0,043	0,028	0,014	0,008	0,005	0,002	0,001
Напряжения, МПа	5,17	3,62	2,54	1,69	0,89	0,48	0,34	0,14	0,00

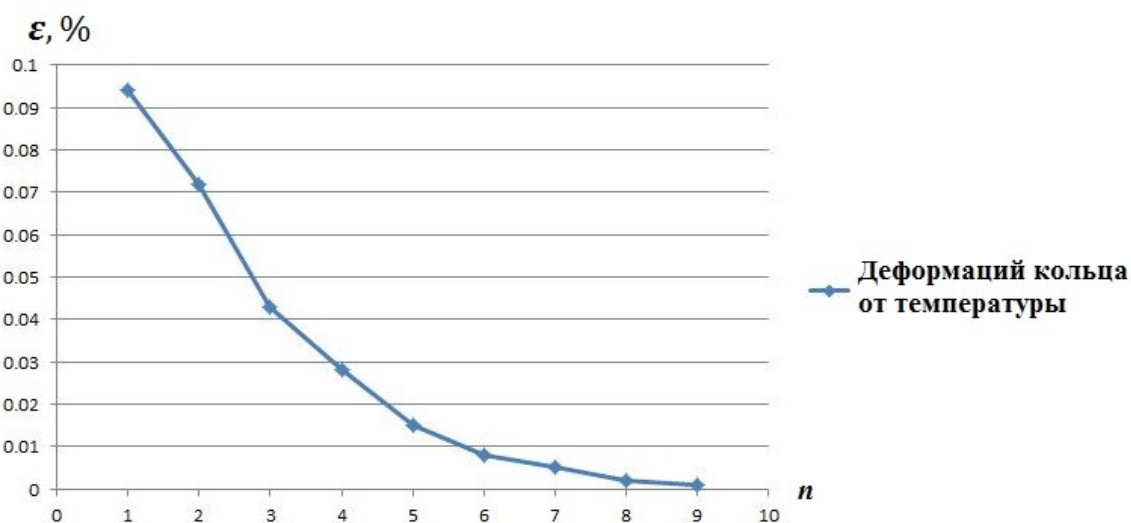


Рис. 4. Зависимость деформаций кольца от температуры в конечном элементе

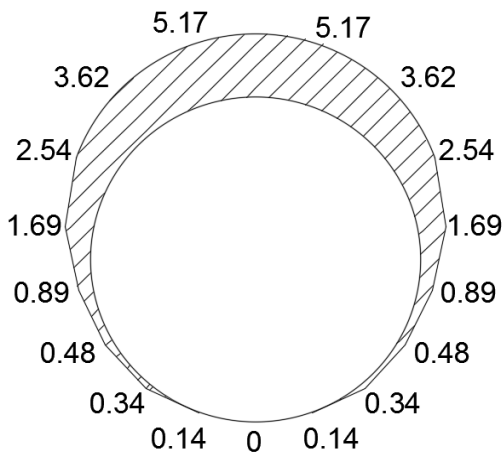


Рис. 5. Эпюра внутренних напряжений элементов кольца, МПа

Для замкнутого кольца все величины, определяющие его НДС, должны возвращаться к своим первоначальным значениям после обхода всего контура. В частности, для окружного перемещения $v(y, t)$ условие периодичности решения имеет вид

$$\int_0^{2\pi R} \frac{\partial v}{\partial y} dy = \int_0^{2\pi R} \left[\frac{w}{R} + \alpha(t) \right] dy = 0, \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – функция, зависящая от времени.

При местном нагревании стального кольца происходят местное изменение модуля упругости (см. табл. 1), а также изменение НДС, что подтверждает эпюра напряжений (см. рис. 5). Эти факторы существенно влияют на математическую модель колебаний оболочки, внося существенные коррективы в собствен-

ные частоты колебаний кольца.

Во многих работах [3 – 5; 7; 8] при изучении изгибных колебаний делается допущение, что длина контура кольца не изменяется. Из этого следует

$$N_y(t) \equiv 0, \quad (2)$$

тогда

$$D(\partial^4 w / \partial y^4) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0.$$

Традиционный подход к построению динамической конечномерной модели предполагает, что воздействие на кольцо в линейной постановке приводит к взаимодействию сопряженных изгибных форм:

$$w(y, t) = f_1(t) \sin \beta y + f_2(t) \cos \beta y. \quad (3)$$

Подстановка (3) в (2) позволяет найти функцию $\alpha(t)$, а затем и окружное погонное усилие:

$$N_y(y, t) = N_y(t) = \frac{Eh}{1 - \mu^2} \left[\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} \right] = \frac{Eh}{1 - \mu^2} \alpha(t).$$

Ортогонализация уравнения (1) к форме динамического прогиба (3) приводит к системе связанных динамических (модальных) уравнений относительно безразмерных амплитуд колебаний $a_i(\tau) = f_i(\tau) / h$ ($i = 1, 2$):

$$\begin{aligned} \ddot{a}_1 + a_1 + \frac{2}{M_k} [\ddot{a}_1 \sin \beta y_0 + \ddot{a}_2 \cos \beta y_0] \sin \beta y_0 &= 0; \\ \ddot{a}_2 + a_2 + \frac{2}{M_k} [\ddot{a}_1 \sin \beta y_0 + \ddot{a}_2 \cos \beta y_0] \cos \beta y_0 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Точками в (4) обозначено дифференцирование по безразмерному времени $\tau = \lambda t$ ($\lambda_n^2 = Dn^4 / \rho h R^4$ – квадрат собственной частоты колебаний кольца); M_k – масса кольца.

Характеристическое уравнение, соответствующее системе (4), определяет две собственные безразмерные частоты изгибных колебаний кольца. Меньшая из дифференцированных собственных частот $\Omega_{nlt} = 1 / \sqrt{1 + 2 / M_k}$. Большая из дифференцированных частот $\Omega_{nlt} = 1$, то есть равна частоте колебаний кольца. Индекс t означает, что решение является традиционным.



Выводы

Изучено НДС кольца при местном нагреве. Получены механические характеристики каждого конечного элемента, что позволило определить влияние местного нагрева на собственные колебания кольца. В линейной постановке определено взаимодействие сопряженных изгибных форм колебания кольца при местном нагреве. Получена система связанных динамических (модальных) уравнений относительно безразмерных амплитуд колебаний. С помощью характеристического уравнения выражены две безразмерные дифференцированные собственные частоты, что и является решением поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серегин, С. В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием / С. В. Серегин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2015. – № 3. – С. 9-13.
2. Власов, В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике / В. З. Власов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
3. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Т. С. Краснопольская. – Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
4. Антуфьев, Б. А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций: моногр. / Б. А. Антуфьев. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
5. Современные испытательные стенды для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн, К. К. Кахоров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № 1-1(29). – С. 110-118.
6. Гемпел, К. А. Справочник по редким металлам / К. А. Гемпел; пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 946 с.
7. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы и температурного сдвига на собственные колебания тонких пластин (мембран) / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № 1-2(30). – С. 105-111.
8. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № 1-3(27). – С. 110-116.

Савченко В. Н., Смагин В. П., Сёмкин С. В.

МАГНИТОИНДУКЦИОННОЕ ПОЛЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА. I. КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Савченко В. Н., Смагин В. П., Сёмкин С. В.

V. N. Savchenko, V. P. Smagin, S. V. Semkin

МАГНИТОИНДУКЦИОННОЕ ПОЛЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА. I. КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

MAGNETIC INDUCTION FIELD GENERATED BY A HYDRODYNAMIC SHOCK WAVE OF UNDERWATER EXPLOSION. I. QUASISTATIC EFFECTS

Савченко Валерий Нестерович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. 8(423) 243-34-72. E-mail: vanes.sav@yandex.ru.

Mr. Valerii N. Savchenko – Dr. habil. in Physical-Mathematical Sciences, Professor, Department of General and Experimental Physics, School of Natural Sciences, Far East Federal University (Russia, Vladivostok); 690950, 8 Suhanova street; tel. +7(914) 69-78-123. E-mail: vanes.sav@yandex.ru.

Смагин Виктор Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией геофизических полей Владивостокского государственного университета экономики и сервиса (Россия, Владивосток); 690014, ул. Гоголя, 41; тел. 8(423) 242-33-32. E-mail: Li15@rambler.ru.

Mr. Victor P. Smagin – Dr. habil. in Physical-Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Geophysical Fields, Vladivostok State University of Economics and Service (Russia, Vladivostok); 690091, 41 Gogol street; tel. +7(423)242-33-32. E-mail: Li15@rambler.ru.

Сёмкин Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса (Россия, Владивосток); 690014, ул. Гоголя, 41; тел. 8(423)229-70-43. E-mail: Li15@rambler.ru.

Mr. Sergei V. Semkin – PhD in Physical-Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Information Technology and Systems, Vladivostok State University of Economics and Service (Russia, Vladivostok); 690091, 41 Gogol street; tel. +7(423)229-70-43. E-mail: Li15@rambler.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены гидродинамика и индуцированные магнитные поля, вызванные подводным взрывом. Рассчитано магнитное поле, генерируемое этим взрывом, в квазистатическом приближении и с учетом индукционного эффекта. Проведен количественный анализ степени влияния самоиндукции на величину магнитного поля.

Summary. Hydrodynamics and induced magnetic field of an underwater explosion are considered. The magnetic field generated by this explosion in a quasistatic approximation taking into account the induction effect is calculated. The effect of self-induction on the magnetic field is analyzed quantitatively.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, океан, подводный взрыв, ударные волны, магнитное поле подводного взрыва, явление самоиндукции проводящей среды, линейное квазистатическое приближение.

Key words: magnetic hydrodynamics, ocean, underwater explosion, magnetic field of underwater explosion, induced field, self-induction in conducting media, linear quasistatic approximation.

УДК 550.373

Введение

Среди многих гидродинамических источников электромагнитных полей в морях и океанах менее других исследован такой специфический, как акустические ударные волны, возникающие от подводных взрывов. В связи с этим подвергнем анализу гидродинамику подводного взрыва, т.е. возникающие акустические волны большой мощности, фактически *ударные волны*, и подробно исследуем сопровождающие их электромагнитные поля, ограничившись вариантом индуцированных магнитных полей. Гидродинамика ударных волн отличается от традиционной динамики мор-

ских волн рядом существенных аспектов и может быть выявлена в предельных переходах при общетеоретическом рассмотрении решений нелинейных уравнений динамики жидкости. Исследуя вопросы взаимодействия возникших от тех или иных возмущений гидроакустических и магнитных полей в рамках общей магнитной гидродинамики океана, мы ограничимся рамками линейного квазистатического приближения.

1. Электродинамика океана как магнитная гидродинамика в приближении слабой линейной связи гидродинамических и электродинамических процессов

1.1. Магнитная гидродинамика океана

Проблема определения электромагнитных полей в морской среде относится к задачам магнитной гидродинамики – морские и океанские воды, несмотря на относительно малую их электрическую проводимость и слабую гиромагнитную связь с внешним магнитным полем, могут быть и были отнесены к числу магнитодинамических сред [5; 10; 14]. В магнитной гидродинамике используется макроскопическое описание жидкостей, рассматриваемых как непрерывные среды, без учета молекулярной структуры [1; 2; 10]. То есть при рассмотрении процессов, связанных с воздействием магнитного поля на проводящие жидкости, в магнитной гидродинамике используются макроскопические (усредненные по «физически бесконечно малому» объему среды) величины и параметры, такие как индукция и напряженность магнитного поля \mathbf{B} и \mathbf{H} , индукция и напряженность электрического поля \mathbf{D} и \mathbf{E} , плотность электрического тока \mathbf{j} (жирным шрифтом указаны векторы характеристик), электрическая и магнитная проницаемости ϵ и μ и электрическая проводимость σ . Это не означает, конечно же, что в магнитной гидродинамике не используются результаты, получаемые при рассмотрении микроскопических механизмов проводимости. Некоторые аспекты этих явлений мы анализируем ниже.

Следует сразу указать, что магнитодинамические эффекты в морской воде, состоящие из генерации электрических токов и индуцируемых этими токами магнитных полей, как правило, весьма слабы [4; 5; 8; 15; 19], но обнаруживаются современной измерительной аппаратурой. Влияние земного магнетизма на гидродинамические движения в большинстве случаев пренебрежимо мало, и эти движения существуют и в отсутствие магнитного поля [15]. Однако при рассмотрении движений морской воды в поле достаточно сильного искусственного источника, в нашем случае это ударные волны от подводного взрыва, может возникнуть и возникает ситуация, когда магнитное поле оказывает влияние на гидродинамические или гидроакустические процессы (пондеромоторные силы), т.е. возникает их взаимодействие – пример такой ситуации мы рассмотрим ниже.

Переходя к постановке задачи о возбуждении электромагнитных полей в океаносфере под воздействием тех или иных гидродинамических источников, сформулируем систему основных уравнений магнитной гидродинамики океанов и морей как связанную систему уравнений электродинамики и гидродинамики, дополненную в общем случае уравнениями состояния океаносферы, уравнением сохранения энтропии и уравнениями электрических, механических и тепловых свойств жидкости в зависимости от давления, температуры и солёности. Уравнения электродинамики представим в виде полной системы уравнений Максвелла [1; 2; 10]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{D} &= \gamma, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ – объемная плотность свободных зарядов, а уравнения связи между векторами \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{D} , \mathbf{H} (материальные уравнения) для покоящихся сред имеют стандартный вид: $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$, здесь ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. Магнитная проницаемость μ морских и океанских вод почти не отличается от единицы и везде в дальнейшем полагается $\mu = 1$. Для нашей задачи необходимы материальные уравнения для движущихся сред, которые отличаются от таковых для неподвижных сред и для малых скоростей движения водных масс \mathbf{v} имеют следующий вид [10]:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} + \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})], \quad \mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{B} + \varepsilon_0 \mu_0 (\varepsilon - 1) [\mathbf{v}, \mathbf{E}], \quad (2)$$

где \mathbf{F} – индукция магнитного поля Земли. Эти уравнения следует дополнить выражением для плотности электрического тока движущейся жидкости, сама возможность возникновения которого в морских водах обусловлена наличием в ней положительных и отрицательных ионов солей. При движении морской воды на эти ионы действуют различные силы, что и приводит к возникновению токов. Пусть \mathbf{v}_+ и \mathbf{v}_- – скорости положительных и отрицательных ионов соответственно, а \mathbf{v} – скорость движения воды. Запишем уравнения движения ионов при наличии электрического поля \mathbf{E} , геомагнитного поля \mathbf{F} и индуцированного магнитного поля \mathbf{B} , полагая, что на них действует сила Лоренца и «сила трения», которую мы будем считать пропорциональной разнице скоростей ионов и скорости воды:

$$m_{\pm} \frac{d\mathbf{v}_{\pm}}{dt} = -\alpha_{\pm} (\mathbf{v}_{\pm} - \mathbf{v}) + q_{\pm} (\mathbf{E} + [\mathbf{v}_{\pm}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]), \quad (3)$$

где m_{\pm} – эффективные массы положительных и отрицательных ионов; α_{\pm} – коэффициенты, связанные с подвижностью ионов; q_{\pm} – их электрические заряды. Запишем уравнение (3) в виде

$$\mathbf{v}_{\pm} = \mathbf{v} - \frac{m_{\pm}}{\alpha_{\pm}} \frac{d\mathbf{v}_{\pm}}{dt} + \frac{q_{\pm}}{\alpha_{\pm}} (\mathbf{E} + [\mathbf{v}_{\pm}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]). \quad (4)$$

Скорости ионов \mathbf{v}_{\pm} мало отличаются от скорости воды \mathbf{v} , поэтому в первом приближении \mathbf{v}_{\pm} можно оценить, подставив в правую часть (4) скорость \mathbf{v} вместо скорости \mathbf{v}_{\pm} , так что на эти уравнения можно смотреть как на рекуррентные соотношения, из которых определяются \mathbf{v}_{\pm} с любой необходимой степенью точности. Можно ограничиться только первым приближением для \mathbf{v}_{\pm} . Вводя обозначения γ_{\pm} для объемных плотностей положительного и отрицательного зарядов, запишем в этом приближении выражение для плотности тока \mathbf{j} :

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{v} - \left(\frac{m_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{m_- \gamma_-}{\alpha_-} \right) \mathbf{a} + \left(\frac{q_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{q_- \gamma_-}{\alpha_-} \right) (\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]), \quad (5)$$

где $\gamma = \gamma_+ + \gamma_-$, $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$ – возникающее ускорение водной среды. Введем обозначения для коэффициента «инерционного тока» (второе слагаемое в (5)) $K = \frac{m_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{m_- \gamma_-}{\alpha_-}$ и для электрической про-

водимости воды $\sigma = \frac{q_+ \gamma_+}{\alpha_+} + \frac{q_- \gamma_-}{\alpha_-}$. Величина $\sigma \approx 4 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, величина K определяется главным образом различием в массах и подвижностях отрицательных и положительных ионов.

Рассмотрим отдельно смысл каждого слагаемого в правой части уравнения (5). Третье слагаемое, которое мы обозначим $\mathbf{j}_{ind} = \sigma (\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})])$, – это индукционный ток, возникающий под действием силы Лоренца. Второе слагаемое $\mathbf{j}_in = K \mathbf{a}$ – ток, возникающий по «инерционному механизму». В работе [3] показано, что существуют ситуации, когда это слагаемое играет важную роль в геофизических процессах. Первое слагаемое $\mathbf{j}_c = \gamma \mathbf{v}$ – конвекционный ток, связанный с переносом макроскопической плотности заряда при движении морской воды. Даже для очень интенсивных движений морской воды величина $|\gamma|$ значительно меньше, чем $|\gamma_{\pm}|$. Поэтому будем считать, что величины K и электрическая проводимость морской воды являются константами, а плотность свободных зарядов γ , а значит и \mathbf{j}_c , равна нулю. Это означает, что мы пренебрегаем квазистатическим электрическим полем $\mathbf{E}_c = \gamma \mathbf{v} / \sigma$, связанным с разделением зарядов. Таким образом,

будем считать, что индуцированный в морской воде электрический ток возникает в результате действия двух механизмов – инерционного и индукционного:

$$\mathbf{j} = -K\mathbf{a} + \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]). \quad (6)$$

Электрическое поле \mathbf{E} , входящее в последнюю формулу, вызвано только индукционными эффектами, связанными с изменением со временем магнитного поля \mathbf{B} . В обзоре А. В. Гульельми [3] приведена оценка вклада каждого из слагаемых, входящих в (6), в общую плотность тока для случая, когда все гидродинамические параметры являются периодическими функциями времени с частотой ω . Показано, что инерционное (первое) слагаемое начинает преобладать над индукционным для частот, превышающих $\omega_c = \sigma F / K$, что для морской воды соответствует примерно 50 Гц.

Отметим, что в результате проведенного анализа токов уравнения (1) и (2) дополнены уравнением (6), но этими уравнениями задача не исчерпывается. Морская вода ограничена снизу дном, а сверху свободной поверхностью океана. Необходимо задать граничные условия на этих поверхностях для векторов, характеризующих электромагнитное поле. Наиболее полно обсуждение граничных условий для движущихся сред в приложении к морской специфике проведено в работе А. Б. Лейбо [9]. Основу для вывода граничных условий в движущейся проводящей среде составляют *ковариантность* уравнений Максвелла по отношению к преобразованиям Лоренца [1; 2; 10] и существующие в этом случае соотношения и формулы преобразования между векторами электромагнитного поля. Для малых скоростей эти условия имеют следующий вид [1; 2]:

$$[\mathbf{n}, (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1)] = \mathbf{i} - v_n (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1),$$

$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1)_n = 0, (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1)_n = \chi,$$

$$[\mathbf{n}, (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1)] = v_n (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1),$$

где χ – плотность поверхностных свободных зарядов; \mathbf{i} – плотность поверхностного тока; \mathbf{n} – вектор нормали. Отметим, что на границе океан-дно $v_n = 0$ и граничные условия совпадают с граничными условиями для неподвижных сред.

Обратимся к стандартным уравнениям гидродинамики, записываемым как сумма уравнения неразрывности и уравнения Эйлера, в правую часть которого добавим объёмную плотность сторонних, в данном случае электромагнитных, сил: $\mathbf{f} = \gamma\mathbf{E} + [\mathbf{j}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})]$. В результате имеем уравнения

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\operatorname{grad} P + \mathbf{f}. \quad (7)$$

Таким образом, уравнения магнитной гидродинамики (1), (2), (6) и (7) морской или океанической воды представляют собой значительно более сложную нелинейную систему уравнений, чем взятые в отдельности уравнения электродинамики и гидродинамики. Однако в магнитной гидродинамике океана можно провести ряд существенных упрощений, приводящих в конечном итоге к раздельному рассмотрению электродинамических и гидродинамических уравнений, как отмечалось в работах [12; 13; 14; 16; 18].

Из уравнений Максвелла (1), материальных уравнений (2) и закона Ома (6) можно получить такое наиболее общее уравнение для магнитоиндукционного поля [16]:

$$\begin{aligned} \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} + \mu_0 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \operatorname{rot} \operatorname{rot} [\mathbf{v}, \mathbf{E}] + \mu_0 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})] + \\ + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \operatorname{rot} [\mathbf{v}, (\mathbf{F} + \mathbf{B})] - \mu_0 K \operatorname{rot} \mathbf{a}. \end{aligned} \quad (8)$$

В зависимости от пространственной структуры и скорости изменения поля можно применять те или иные приближения. Если пренебречь токами смещения и другими слагаемыми, пропорциональными $\varepsilon_0\mu_0$, то для магнитного поля \mathbf{B} получим уравнение

$$\mu_0\sigma\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}-\nabla^2\mathbf{B}=\mu_0\sigma\operatorname{rot}[\mathbf{v},(\mathbf{F}+\mathbf{B})]-\mu_0K\operatorname{rot}\mathbf{a}. \quad (9)$$

Если же в правой части уравнения (9) пренебречь величиной индуцированного поля \mathbf{B} по сравнению с величиной геомагнитного поля, то для искомого поля получим уравнение типа уравнения диффузии, решение которого для безграничной среды при нулевых начальных условиях в математической литературе известно и можно записать в виде [11]

$$\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=\int_0^t\frac{dt'}{(2\beta\sqrt{\pi(t-t')})^3}\times \\ \times\int\operatorname{rot}([\mathbf{v}(\mathbf{r}',t'),\mathbf{F}]-K/\sigma\mathbf{a}(\mathbf{r}',t'))\exp\left(-\frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}{4\beta^2(t-t')}\right)d\mathbf{r}', \quad \beta^2=1/\mu_0\sigma. \quad (10)$$

Если далее пренебречь явлением самоиндукции (отбросить слагаемое, содержащее $\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$), то получим уравнение Пуассона, решение которого отличается от решения (10) и имеет следующий вид [11]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r},t)=\frac{\mu_0\sigma}{4\pi}\int\frac{[(\mathbf{v}(\mathbf{r}',t),\mathbf{F})-(K/\sigma)\mathbf{a}(\mathbf{r}',t)),(\mathbf{r}-\mathbf{r}')]}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3}d\mathbf{r}'. \quad (11)$$

В случае, когда движение воды является безвихревым ($\operatorname{rot}\mathbf{v}=0$ и $\operatorname{rot}\mathbf{a}=0$), электрический ток не возникает по инерционному механизму и в решениях (10) и (11) не будет содержаться слагаемых с вектором \mathbf{a} . Следует также учитывать, что кроме геомагнитного поля \mathbf{F} и индуцированного движением жидкости поля \mathbf{B} , определяемого из уравнения (8) в том или ином приближении, в водной среде могут быть также и поля, созданные искусственными источниками, например, электромагнитными антеннами. В случае, когда такие магнитные поля \mathbf{B}_0 присутствуют, для генерации поля \mathbf{B} они играют ту же роль, что и геомагнитное поле \mathbf{F} , поэтому в этих случаях необходимо заменить \mathbf{F} в уравнении (8) на $\mathbf{F}+\mathbf{B}_0$. Что касается самого поля \mathbf{B}_0 , то его значение находится из уравнений Максвелла, записанных для неподвижной водной среды и соответствующих граничных условий. При этом уравнение для поля \mathbf{B}_0 имеет следующий вид [14; 17]:

$$-\nabla^2\mathbf{B}_0+\mu_0\sigma\frac{\partial\mathbf{B}_0}{\partial t}+\mu_0\varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial^2\mathbf{B}_0}{\partial t^2}=0.$$

Отметим, что отбрасывание в этом уравнении слагаемого, соответствующего максвелловскому току смещения $\mu_0\varepsilon_0\varepsilon\frac{\partial^2\mathbf{B}_0}{\partial t^2}$, не имеет того же смысла, что отбрасывание аналогичного слагаемого в уравнении для индуцированного поля (8). Поле \mathbf{B}_0 , созданное токами, например, в антенне, может иметь значительно более высокую частоту, чем частоты гидродинамических и акустических процессов. Пространственно-временная структура поля \mathbf{B}_0 зависит от типа и частоты источника и расстояния до него. На большом расстоянии от источника достаточно высокой частоты его поле имеет вид плоской электромагнитной волны $\mathbf{B}_0=\mathbf{B}_a\exp(i(\omega t-(\mathbf{k},\mathbf{r})))$, где \mathbf{k} – комплексный волновой вектор, величина которого равна $k=\sqrt{\omega\mu_0(\omega\varepsilon_0-i\sigma)}$. При частотах, когда ток

смещения мал по сравнению с током проводимости (условие $\omega \ll \sigma/(\epsilon\epsilon_0)$), величина волнового вектора становится равной

$$k = \alpha - i\beta \approx (1-i)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}}. \quad (12)$$

Оценим постоянную затухания β , толщину скин-слоя $\delta = 1/\beta$ и длину волны в воде $\lambda = 2\pi/\alpha$, преобразуя их согласно (12) и подставив численную табличную величину μ_0 , найдем

$$\beta = 1,99 \cdot 10^{-3} \sqrt{\nu\sigma}, \quad \delta = 500/\sqrt{\nu\sigma}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{10^7}{\nu\sigma}}, \quad (13)$$

где $\nu = \omega/(2\pi)$ – линейная частота. Тогда, например, при $\nu = 1$ МГц и $\sigma = 4$ Сим/м получаем, согласно формулам (13), $\beta \approx 4$ м⁻¹, $\delta = 0,25$ м, $\lambda \approx 1,6$ м, т.е. волна такой частоты практически не распространяется в морской воде. Если же частота волны порядка 100 Гц, то глубина проникновения в морскую среду будет равной $\delta \approx 25$ м.

1.2. Теория взаимодействия гидроакустических и электромагнитных полей в океане

Ниже мы рассматриваем два аспекта процесса взаимодействия гидроакустических и возникающих от них переменных электромагнитных полей. В одном случае гидроакустическая волна, попадающая в область переменного электромагнитного поля, индуцирует дополнительное поле, возмущающее первичное электромагнитное, а в другом случае взаимодействие гидроакустического и электромагнитного полей может привести к возникновению добавочных акустических гармоник, что представляется чрезвычайно интересным и важным.

Рассмотрим ситуацию, когда в морской или океанической среде присутствует тот или иной источник возбуждения электромагнитного поля, а также электромагнитное поле того или иного искусственного происхождения. Структура поля в этом случае определяется как параметрами источника, так и электрическими свойствами морской среды. Определение этой структуры для различных конфигураций источника является отдельной задачей, рассмотренной в разных вариантах, например, в [12; 13; 16; 18; 19]. Предположим, что в области пространства, где есть такое электромагнитное поле, распространяется гидроакустическая (звуковая) волна. Эта волна индуцирует дополнительное электромагнитное поле, которое накладывается на поле источника. Исследуем поле, индуцированное плоской монохроматической звуковой волной с частотой ω , распространяющейся вблизи источника магнитного поля, которое периодически (с частотой ω_0) меняется во времени. Как будет показано ниже, характерной особенностью индуцированного поля является наличие двух гармоник с частотами $\omega + \omega_0$ и $\omega - \omega_0$. Используя уравнения Максвелла (1) и закон Ома (6), можем получить уравнение, связывающее индуцированное поле \mathbf{B} с магнитным полем источника \mathbf{B}_0 и полем скоростей акустической волны \mathbf{v} , отличающееся от уравнения (8):

$$-\nabla^2 \mathbf{B} + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = \mu_0 \sigma \text{rot}[\mathbf{v}, \mathbf{B}_0]. \quad (14)$$

В соответствии с постановкой задачи поле источника и его скорость зададим в форме

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{b}_0 \exp[i\omega_0 t], \quad \mathbf{v} = v_a \mathbf{e}_k \exp[i((\mathbf{k}, \mathbf{r}) - \omega t)],$$

где $\mathbf{e}_k = \mathbf{k}/k$, $\omega = c_0 k$, k – волновое число; v_a – амплитуда акустической скорости c_0 , вследствие чего правая часть уравнения (14) примет такой вид:

$$\frac{\mu_0 \sigma v_a}{2} \left(e^{i(\omega_0 - \omega)t} \text{rot}([\mathbf{e}_k, \mathbf{b}_0] e^{i(\mathbf{k}, \mathbf{r})}) + e^{i(\omega_0 + \omega)t} \text{rot}([\mathbf{e}_k, \mathbf{b}_0] e^{-i(\mathbf{k}, \mathbf{r})}) \right). \quad (15)$$

Отметим, что наличие в выражении (15) двух слагаемых с частотами $\omega + \omega_0$ и $\omega - \omega_0$ обусловлено тем, что для правильной записи уравнения в вещественной форме в правой части должна стоять не вещественная часть произведения функций, а произведение их вещественных частей.

Решение уравнения (14) будем искать в виде суммы двух полей

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_+ \exp[i((\omega_0 + \omega)t - (\mathbf{k}, \mathbf{r}))] + \mathbf{B}_- \exp[i((\omega_0 - \omega)t + (\mathbf{k}, \mathbf{r}))], \quad (16)$$

так что, подставляя его в (14), получаем одинаковые по виду уравнения для каждой функций \mathbf{B}_+ и \mathbf{B}_- , записанные ниже в виде одного уравнения:

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \mathbf{B}_\pm \pm 2ik(\mathbf{e}_k, \nabla) \mathbf{B}_\pm + (k^2 - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon(\omega_0 \pm \omega)^2 + i\mu_0 \sigma(\omega_0 \pm \omega)) \mathbf{B}_\pm = \\ = \frac{\mu_0 \sigma \nabla_a}{2} (\text{rot}[\mathbf{e}_k, \mathbf{b}_0] \mp ik[\mathbf{e}_k, [\mathbf{e}_k, \mathbf{b}_0]]). \end{aligned} \quad (17)$$

Рассмотрим два частных случая, в которых можно пренебречь теми или иными слагаемыми в левой части уравнений (17). Предположим, что длина звуковой волны значительно меньше l – размеров области, в которой существенно меняется поле \mathbf{b}_0 , т.е. $kl \gg 1$. Естественно предположить, что характерный масштаб изменения полей \mathbf{B}_\pm тоже порядка l , в этом случае наибольшим в левой части (17) является третье слагаемое. Оставляя только одно это слагаемое, мы получим алгебраическое уравнение для магнитного поля \mathbf{B}_\pm . Наименьшим по величине в случае $kl \gg 1$ является первое слагаемое в левой части (17). Если же отбросить только его, получим для полей \mathbf{B}_\pm в (16) обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка. В противоположном случае, когда $kl \ll 1$, отбрасывая второе слагаемое, мы получим из (17) уравнение Гельмгольца, а при малых ω_0 , когда можно отбросить и третье слагаемое в левой части (17), получим уравнение Пуассона. Полученных результатов уравнений магнитной гидродинамики гидроакустических волн достаточно, чтобы рассмотреть электромагнитные поля от ударных волн.

2. Магнитное поле, генерируемое пространственно-симметричным движением жидкости, возникающим при подводном взрыве

2.1. Гидродинамика ударных волн, возникающих от подводного взрыва

Рассмотрим специфический для электродинамики океана гидроакустический источник индуцируемого электромагнитного поля – акустические ударные волны, возникающие от подводных взрывов. Подвергнем анализу прежде всего гидродинамику подводного взрыва, т.е. возникающие акустические волны большой мощности, фактически *ударные волны*, а уже затем исследуем сопровождающие их электромагнитные поля, ограничившись вариантом магнитных полей. В процессе взрыва во взрывчатом веществе возникает детонационная волна – тонкий, быстро движущийся слой, в котором происходит химическая реакция. Этот слой отделяет взрывчатое вещество в исходном состоянии от продуктов взрыва, находящихся под высокими давлением и температурой. При выходе детонационной волны на поверхность заряда в воде возникает ударная волна – резкий всплеск давления, распространяющийся от места взрыва со скоростью, превышающей скорость звука. Непосредственно за фронтом ударной волны давление может достигать нескольких тысяч атмосфер, а плотность воды значительно отличается от начальной плотности. Давление за фронтом ударной волны резко падает – приблизительно по экспоненциальному закону, продолжительность затухания не превосходит нескольких миллисекунд. Распространение ударной волны характеризуется рядом особенностей, отличающих эту волну от волн малой амплитуды (звуковых) [6].

Основные особенности таковы:

1. Скорость распространения ударной волны вблизи заряда в несколько раз превышает скорость звука, равную для воды примерно 1520 м/с. По мере продвижения скорость ударной волны весьма быстро падает до скорости звука, а давление уменьшается до величины акустического.



2. Амплитуда давления в сферической ударной волне уменьшается в зависимости от расстояния быстрее, чем в акустическом приближении, но на больших расстояниях приближается к акустическому закону.

3. Профиль волны постепенно расширяется по мере ее распространения. Размывание профиля особенно заметно на малых расстояниях от заряда, когда давление во фронте ударной волны достигает максимальной величины.

4. При интенсивных гидродинамических процессах, вызванных подводным взрывом, может возникнуть такая ситуация, когда условие адиабатичности нарушается на фронте ударной волны и большие градиенты давления и скорости приводят к значительной диссипации энергии.

Вслед за распространением ударной волны начинают расширяться сильно сжатые продукты детонации – начальное давление в газовом пузыре сильно уменьшается после излучения ударной волны, но все еще остается гораздо больше равновесного гидростатического давления. Вода в непосредственной близости от газовой сферы обладает значительной радиальной скоростью, вызванной как прошедшей ударной волной, так и давлением газов. Поэтому диаметр пузыря в начальной стадии расширения стремительно возрастает. Расширение продолжается в течение сравнительно продолжительного промежутка времени. По мере расширения внутреннее давление газа постепенно падает, но вследствие инерции расходящегося потока воды расширение продолжается и после того, как давление падает ниже равновесного значения. И после прекращения расширения начинается сжатие с непрерывно возрастающей скоростью, продолжающееся до тех пор, пока возрастающее давление в пузыре не остановит этот процесс, после чего опять начинается расширение. Следовательно, происходит пульсация газовой сферы, сопровождающаяся вторичными пульсациями давления, распространяющимися в воде со скоростью звука. Давление в воде при пульсациях достигает максимального значения в моменты, когда скорость расширения или сжатия пузыря максимальна, т.е. когда радиус пузыря приближается к минимальному значению. Таким образом, гидродинамические процессы, сопровождающие подводный взрыв, можно условно разделить на два типа. Первый – связанный с образованием и распространением ударной волны, характеризующийся высокими давлениями и значительным превышением плотности над равновесным значением. И второй – связанный с расширением и пульсациями газовой сферы, а также с распространением вторичных пульсаций давления.

Процессы первого типа идут в сравнительно узком (порядка нескольких метров) сферическом слое непосредственно за фронтом ударной волны. Для их количественного описания нужно учитывать сжимаемость жидкости в широком диапазоне давлений, а также условия на фронте ударной волны, являющейся, в сущности, поверхностью разрыва гидродинамических функций. Для описания процессов второго типа достаточно ограничиться приближением несжимаемой жидкости или акустическим приближением для описания вторичных пульсаций давления.

Прежде рассмотрим движение газовой сферы. Для потенциального движения жидкости её скорость \mathbf{v} определяется формулой $\mathbf{v} = -\nabla\varphi$, а уравнение для потенциала скорости φ имеет стандартную форму при принятии условий адиабатического процесса (изменение энтропии не происходит, так что $\delta S = 0$)

$$\nabla^2\varphi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial v^2}{\partial t} + \frac{1}{2}(\mathbf{v}, \nabla)v^2 \right), \quad (18)$$

где $c^2 = (\partial P / \partial \rho)_S$ – квадрат скорости волны, здесь P и ρ – соответственно давление и плотность воды. В приближении несжимаемой жидкости в уравнении (18) отбрасывается вся правая часть, и оно превращается в уравнение Лапласа, имеющее сферически симметричное решение: $\varphi = f(t)/r$, $v = f(t)/r^2$. В акустическом приближении в (18) отбрасываются нелинейные по v слагаемые, а $c = c_0 = \text{const}$. Тогда сферически симметричное решение для этого случая имеет вид потенциала сферической волны $\varphi = f(t - r/c_0)/r$, а скорость содержит два слагаемых:

$$v = \frac{f(t-r/c_0)}{r^2} + \frac{f'(t-r/c_0)}{c_0 r}.$$

Если движение жидкости вызвано расширением или сжатием газового пузыря радиуса $a(t)$, то функция f определяется из условия $v(a,t) = \dot{a}(t)$. В приближении несжимаемой жидкости искомая функция $f(t)$ равна $f(t) = a^2(t)\dot{a}(t)$. В акустическом приближении $f(t)$ можно найти из уравнения

$$\frac{a(t)}{c_0} \dot{f}(t) + f(t) = a^2(t)\dot{a}(t).$$

Если в этом уравнении пренебречь первым слагаемым, то эффект сжимаемости можно приближенно учесть только с помощью «времени запаздывания» $(r-a/c_0)$ и считать, что потенциал скорости в акустическом приближении имеет вид

$$\varphi = \frac{a^2(t-(r-a)/c_0)\dot{a}(t-(r-a)/c_0)}{r}.$$

Динамику газовой сферы (без учета эффекта плавучести) можно описать (см. [6; 7]) с помощью условия сохранения энергии $E_l + A = E_1 - E(a)$, где E_l – кинетическая энергия жидкости; $A = P_0(V(a) - V_0)$ – работа против сил гидростатического давления; $E(a)$ – внутренняя энергия газового пузыря радиуса a ; E_1 – начальная энергия газовой сферы. Эта начальная энергия пропорциональна общей энергии W , выделившейся при взрыве, так что она равна величине $E_1 = \eta_1 W$, где $\eta_1 \approx 0,41$ [6]. В приближении несжимаемой жидкости вид и значение E_l можно найти, проинтегрировав по объему удельную кинетическую энергию:

$$E_l = \int_a^\infty \frac{\rho_0 v^2}{2} 4\pi r^2 dr = 2\pi\rho_0 a^3 \dot{a}^2.$$

Пренебрегая начальным объемом V_0 и внутренней энергией расширившегося пузыря $E(a)$, получим уравнение, определяющее радиус газового пузыря:

$$2\pi\rho_0 a^3 \dot{a}^2 + \frac{4}{3}\pi a^3 P_0 = E_1. \quad (19)$$

Максимальный радиус пузыря a_{m1} можно найти, положив $\dot{a} = 0$ в (19), что дает величину $a_{m1} = \sqrt[3]{\frac{3E_1}{4\pi P_0}}$, так что, например, при взрыве тротилового заряда массой 250 кг на глубине 90 м, параметры взрыва, необходимые нам для расчетов, будут иметь такие величины: $W \approx 10^9$ Дж, $P_0 \approx 10^6$ Па, $a_{m1} \approx 4,5$ м.

Зависимость $a(t)$ в неявном виде можно найти, проинтегрировав уравнение (19), после чего получим возможность вычислять продолжительность времени разных этапов (пульсаций) взрыва по формуле

$$t = \sqrt{\frac{3\rho_0}{2P_0}} \int_{a_0}^a \frac{da}{\sqrt{(a_m/a)^3 - 1}}.$$

Несмотря на кажущуюся простоту, интеграл этого выражения не вычисляется через элементарные функции, его можно выразить только через специальные бета-функции, содержащиеся в математических справочниках спецфункций.

Установлено (см. [6; 7]), что пузырь, расширяясь до максимального радиуса a_{m1} за время $T_1/2$, сжимается затем до исходного радиуса за то же самое время $T_1/2$. Величина этого периода равна приблизительно времени $T_1 \approx 1,83a_{m1}\sqrt{\rho_0/P_0}$, что дает для указанных выше параметров взрыва время $T_1 \approx 0,25$ с. При сжатии пузыря до минимального радиуса (в момент времени T_1) давление в пузыре достигает максимума и приближение несжимаемой жидкости становится не вполне корректным. В этот момент в жидкости происходят турбулентные процессы и излучение вторичной волны давления [6; 7], на которые расходуется значительная доля энергии пузыря E_1 . Изменение знака радиальной скорости \dot{a} происходит в момент максимального сжатия очень быстро, практически мгновенно, и сжатие сменяется расширением пузыря с оставшейся к моменту начала второй пульсации энергией $E_2 = \eta_2 W$, $\eta_2 \approx 0,14$. Для приведенных выше параметров $a_{m2} \approx 3,1$ м и новый период времени равен $T_2 \approx 0,17$ с. Аналогично при завершении второй пульсации происходит излучение еще одной вторичной волны давления, и начинается третья пульсация с энергией $E_3 = \eta_3 W$, $\eta_3 \approx 0,08$, а общее число пульсаций может достигать 5-6 при благоприятных условиях. Однако следует отметить, что пренебрежение эффектом всплывания пузыря становится слишком грубым при рассмотрении второй и последующих пульсаций. Имея в виду качественные особенности поведения решения уравнения (19), можем приближенно принять, что $\dot{a} = \dot{a}_0 - 2\dot{a}_0 t/T_1$ во время первой пульсации, а радиус пузыря оказывается равен величине $a = a_0 + \dot{a}_0 t - \dot{a}_0 t^2/T_1$. При $t = T_1/2$ $a = a_{m1}$, что позволяет найти скорость расширения пузыря газа равной $\dot{a}_0 = \frac{4(a_{m1} - a_0)}{T_1} \approx \frac{4a_{m1}}{T_1}$, что дает скорость, равную величине $\dot{a}_0 \approx 72$ м/с при принятых параметрах. Пренебрегая величиной a_0 , получаем $a = \frac{4a_{m1}}{T_1} t(1 - t/T_1)$, $\dot{a} = \frac{4a_{m1}}{T_1} (1 - 2t/T_1)$. Выражение для скорости распространения газового пузыря в приближении несжимаемой жидкости определяется в виде

$$v = \frac{f(t)}{r^2} = \frac{(4a_{m1})^3}{T_1} x^2(1-x)^2(1-2x) \frac{1}{r^2}, \quad x = t/T_1.$$

Уже на первых стадиях мощного подводного взрыва возможно образование сильной ударной волны. Хотя теоретические модели гидродинамики подводного взрыва существуют уже давно [6; 7] и хорошо известны специалистам, однако еще и в настоящее время нет универсальной модели, позволяющей определить $v(r', t)$ на всех этапах взрыва. Можно лишь рассмотреть те или иные приближения, подходящие для разных стадий процесса. Например, на начальной стадии взрыва скорость ударной волны можно считать равной

$$v(r', t) = r' / 10t, \tag{20}$$

а радиус фронта ударной волны считать равным $R(t) = At^{2/5}$ [7]. Константу A можно выразить через энергию взрыва W и невозмущенную плотность воды ρ_0 :

$$A = \left(\frac{225W}{2\pi\rho_0} \right)^{1/5}, \tag{21}$$

которая будет использована в расчетах на начальной стадии взрыва.

2.2. Магнитное поле в квазистатическом приближении (без учета самоиндукции)

При подводных взрывах на большой глубине на первом этапе, как уже отмечалось, возникает волна со сферически симметричным полем скоростей. Осуществим расчет индуцированного магнитного поля в квазистатическом приближении, а затем и с учетом явления самоиндукции.

Рассмотрим точечный источник постоянной интенсивности, взрывающийся в момент времени $t = 0$, так что граница области движения воды расширяется со скоростью звука c и жидкость считается несжимаемой везде, кроме слоя $r = ct$. Его возникшее начальное центрально-симметричное поле скоростей $v(r, t)$ определяется следующим образом:

$$v(r, t) = \begin{cases} \frac{v_0 r_0^2}{r^2}; & 0 < r < ct, \\ 0; & r > ct \end{cases}, \quad (22)$$

где v_0 – скорость воды на расстоянии r_0 от центра взрыва. В квазистатическом приближении магнитное поле можно рассчитать по закону Био – Савара – Лапласа как интеграл вида

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 \sigma}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{v}(\mathbf{r}', t), \mathbf{F}], (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\mathbf{r}'. \quad (23)$$

Поскольку движение воды сферически симметричное, введем декартовую и сферическую системы координат, направив ось z по геомагнитному полю \mathbf{F} , а оси x и y таким образом, чтобы точка наблюдения с радиус-вектором \mathbf{r} лежала в плоскости xz . Тогда декартовые компоненты вектора $\mathbf{v}(\mathbf{r}', t)$, записанные как функции от сферических координат точки интегрирования \mathbf{r}' , имеют вид $v_x = v(r', t) \sin \theta' \cos \varphi'$, $v_y = v(r', t) \sin \theta' \sin \varphi'$, $v_z = v(r', t) \cos \theta'$, а компоненты вектора $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$, соответственно, вид $(r - r')_x = r \sin \theta - r' \sin \theta' \cos \varphi'$, $(r - r')_y = -r' \sin \theta' \sin \varphi'$, $(r - r')_z = r \cos \theta - r' \cos \theta'$. Компоненты двойного векторного произведения в числителе подынтегрального выражения (23) будут такими:

$$[[\mathbf{v}, \mathbf{F}], (\mathbf{r} - \mathbf{r}')_x] = -F v(r', t) \sin \theta' \cos \varphi' (r \cos \theta - r' \cos \theta'),$$

$$[[\mathbf{v}, \mathbf{F}], (\mathbf{r} - \mathbf{r}')_y] = -F v(r', t) \sin \theta' \sin \varphi' (r \cos \theta - r' \cos \theta'),$$

$$[[\mathbf{v}, \mathbf{F}], (\mathbf{r} - \mathbf{r}')_z] = F v(r', t) (r \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' - r' \sin^2 \theta'),$$

квадрат разности $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2$ будет равен $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2 = r^2 + r'^2 - 2rr'(\sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' + \cos \theta \cos \theta')$.

Подставляя все эти выражения в (19), замечаем, что $B_y = 0$, а для двух ненулевых компонент индуцированного поля получаем такие их интегральные формы:

$$B_x = -\frac{\mu_0 \sigma F}{4\pi} \int \frac{v(r', t) r'^2 (r \cos \theta - r' \cos \theta') \sin^2 \theta' \cos \varphi' dr' d\theta' d\varphi'}{(r^2 + r'^2 - 2rr'(\sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' + \cos \theta \cos \theta'))^{3/2}},$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \sigma F}{4\pi} \int \frac{v(r', t) r'^2 (r \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' - r' \sin^2 \theta') \sin \theta' dr' d\theta' d\varphi'}{(r^2 + r'^2 - 2rr'(\sin \theta \sin \theta' \cos \varphi' + \cos \theta \cos \theta'))^{3/2}},$$

что позволяет определить компоненты магнитного поля в произвольной точке пространства. Интегрирование по θ' и φ' в этих интегралах можно провести в общем виде, выразив результат через эллиптические интегралы Лежандра [11]. И, напротив, в случае, когда точка наблюдения лежит на оси z ($\theta = 0$), результат интегрирования по углам θ' и φ' может быть выражен в элементарных функциях. В этом последнем случае находим, что горизонтальная компонента отсутствует, т.е. $B_x = 0$, а для единственной вертикальной компоненты B_z получим

$$B_z = -\frac{\mu_0 \sigma F}{2} \int_0^{R(t)} v(r', t) r'^3 dr' \int_0^\pi \frac{\sin^3 \theta' d\theta'}{(r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta')^{3/2}}. \quad (24)$$

Поскольку внутренний интеграл вычисляется в элементарных функциях, а именно равен

$$\int_0^{\pi} \frac{\sin^3 \theta' d\theta'}{(r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta')^{3/2}} = \frac{4}{3(\max(r, r'))^3},$$

то для вертикальной компоненты (именуем её нижним индексом q) после подстановки в подынтегральное выражение (24) скорости (22), вычислив интеграл, получим

$$B_q = \begin{cases} -D \frac{\sqrt{\pi}}{3} \frac{\tau^2}{z^3}; & 0 < \tau < z \\ -D \frac{\sqrt{\pi}}{3} (3/z - 2/\tau); & \tau > z \end{cases}, \quad (25)$$

где $D = \frac{\mu_0 \sigma F v_0 r_0^2 \omega_s}{c \sqrt{\pi}} = \frac{v_0 r_0^2 \omega_s^2}{c^3 \sqrt{\pi}} F$, а характерные время $\tau = \omega_s t$ и расстояние $z = \omega_s r / c$ – безразмерные переменные. Решение (25) описывает характерную особенность индуцированных магнитных полей – так называемый *магнитный предвестник* – отличную от нуля величину поля в области, куда еще не дошло гидродинамическое возмущение (т.е. при $\tau < z$). В анализируемом решении (25) величина предвестника убывает обратно пропорционально кубу расстояния z^3 , в то время как установившееся значение поля (при стремлении параметра времени $\tau \rightarrow \infty$) убывает обратно пропорционально z .

2.3. Магнитное поле с учетом самоиндукции

Оценим и рассчитаем влияние явления самоиндукции, которое по-разному влияет на величину магнитного поля в различных ситуациях. Например, для точечного акустического источника влияние самоиндукции можно оценить посредством сравнения частоты источника ω с характерной частотой $\omega_s = \mu_0 \sigma c^2 \approx 14 \text{ с}^{-1}$, и, как показано в [14; 16], при частотах $\omega \gg \omega_s$ самоиндукцией можно пренебрегать. Но для непериодических масштабных движений океанских вод, возникающих при подводном взрыве, весьма затруднительно сформулировать какой-либо простой критерий оценки влияния самоиндукции на величину индуцированного поля. Для оценки роли самоиндукции в этой ситуации представляется разумным сформулировать простую модель, отражающую характерные особенности процесса, и непосредственно рассчитать для неё величины магнитных полей как с учетом самоиндукции, так и без её учета. Для определения магнитного поля с учетом самоиндукции необходимо решить хорошо известное в морской магнитной гидродинамике исходное уравнение для поля магнитной индукции в проводящей водной среде (уравнение (14) без третьего слагаемого слева)

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \text{rot} [\mathbf{v}, \mathbf{F}].$$

Для безграничной среды и нулевых начальных условий для искомого поля решение этого уравнения имеет следующий вид [11]:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{(\mu_0 \sigma)^{5/2}}{16 \sqrt{\pi^3}} \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{5/2}} \int [[\mathbf{v}(\mathbf{r}', t'), \mathbf{F}], (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] \exp\left(-\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2 \mu_0 \sigma}{4(t-t')}\right) d\mathbf{r}'. \quad (26)$$

Как и в квазистатическом приближении, ограничимся вычислением поля в точках на оси z . Подставив скорость (22) в (26) и переходя к тем же безразмерным переменным, что и в выражении (25), получим

$$B_{in} = -\frac{D}{z^2} \int_0^\tau \Psi dy, \quad \Psi = \int_0^y \frac{\Phi dx}{x}, \quad \Phi = \frac{1}{\sqrt{y-x}} \left\{ \exp\left(-\frac{(z+x)^2}{4(y-x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z-x)^2}{4(y-x)}\right) + \frac{2(y-x)}{xz} \left[\exp\left(-\frac{(z+x)^2}{4(y-x)}\right) - \exp\left(-\frac{(z-x)^2}{4(y-x)}\right) \right] \right\}. \quad (27)$$

Можно показать аналитически, что при устремлении параметра $\tau \rightarrow \infty$ интеграл (26) переходит в интеграл (23) при условии, что скорость движения жидкости не зависит от времени. Действительно, переходя в (26) к новой переменной $\chi = 1/(t-t')$ и обозначив $\beta^2 = 1/\mu_0\sigma$, получим первоначально такое новое выражение для интеграла (26):

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \int_{1/t}^{\infty} \int \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}{4\beta^2} \chi\right) \frac{\chi^{-1/2} d\chi}{(2\beta\sqrt{\pi})^3} \text{rot}[\mathbf{v}(\mathbf{r}'), \mathbf{F}] d\mathbf{r}'.$$

Далее, поскольку при $\tau \rightarrow \infty$ интеграл по χ стремится к $\frac{2\beta\sqrt{\pi}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$, постольку искомое выражение для $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$, соответственно, стремится к окончательному виду $\frac{\mu_0\sigma}{4\pi} \int \frac{\text{rot}[\mathbf{v}(\mathbf{r}'), \mathbf{F}]}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r}'$.

В таком случае, следовательно, и решение (27) при больших значениях τ переходит в (25), то есть $B_{in} \rightarrow B_q$ при $\tau \rightarrow \infty$. Но при конечных значениях τ различие функций $B_{in}(\tau)$ и $B_q(\tau)$ может оказаться весьма существенным. Для того чтобы исследовать это различие, были проведены численные расчеты магнитных полей в квазистатическом приближении B_q (по формуле (25)) и с учетом самоиндукции B_{in} (по формуле (27)). Было установлено, что учет самоиндукции *всегда приводит к уменьшению величины* индуцированного магнитного поля ($B_q > B_{in}$), что отражено графически на рис. 1 и 2. При малых значениях расстояния от центра взрыва ($z < 0,5$) влияние самоиндукции незначительно (см. рис. 3) – различие величин $B_{in}(\tau)$ и $B_q(\tau)$ не превышает 5 % при всех значениях τ .

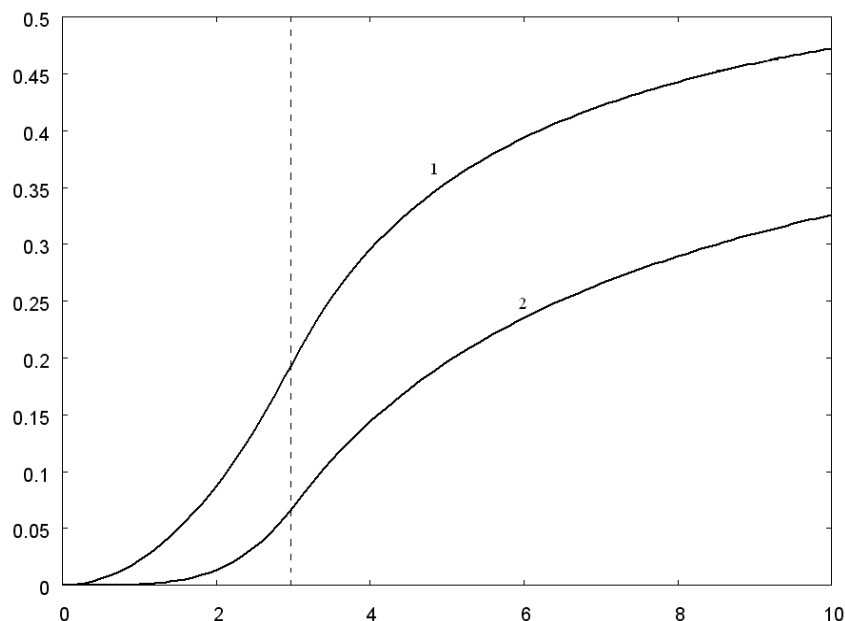


Рис. 1. Зависимость (в единицах D) B_q (кривая 1) и B_{in} (кривая 2) от τ ($z = 3$)

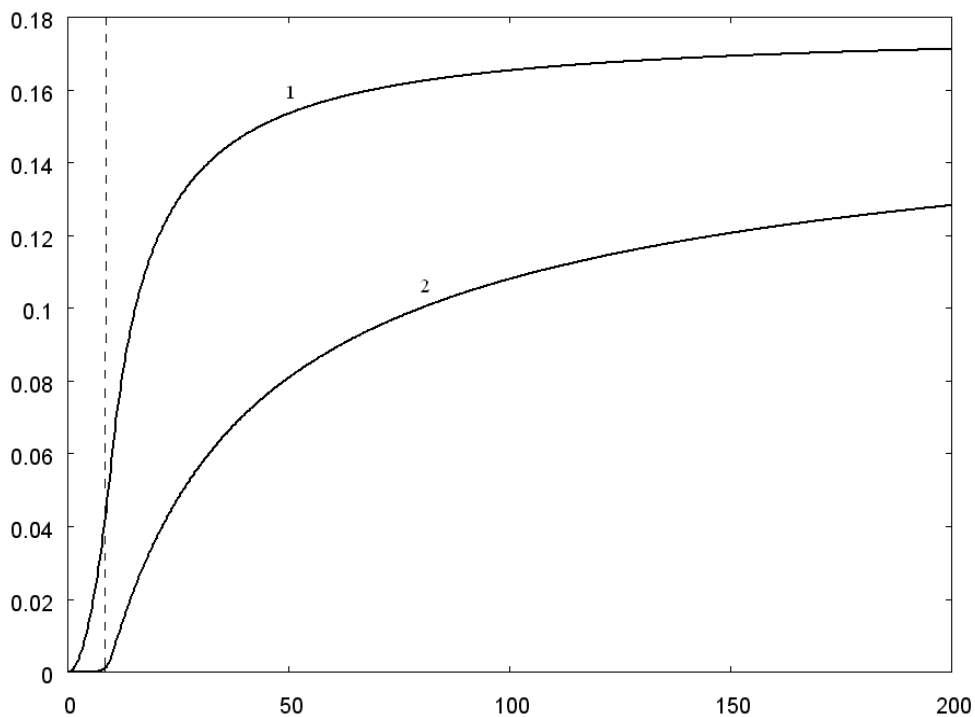


Рис. 2. Зависимость (в единицах D) B_q (кривая 1) и B_{in} (кривая 2) от τ ($z = 10$)

На значительных ($z > 5$) расстояниях от центра взрыва самоиндукция существенно сказывается на величине поля. В области предвестника B_{in} (до пунктирной линии на рис. 1 и 2) значительно меньше, чем $B_q(\tau)$. При больших значениях z $B_{in}(\tau)$ значительно медленнее приближается к предельному значению, чем $B_q(\tau)$, что отражено на рис. 2 и 4.

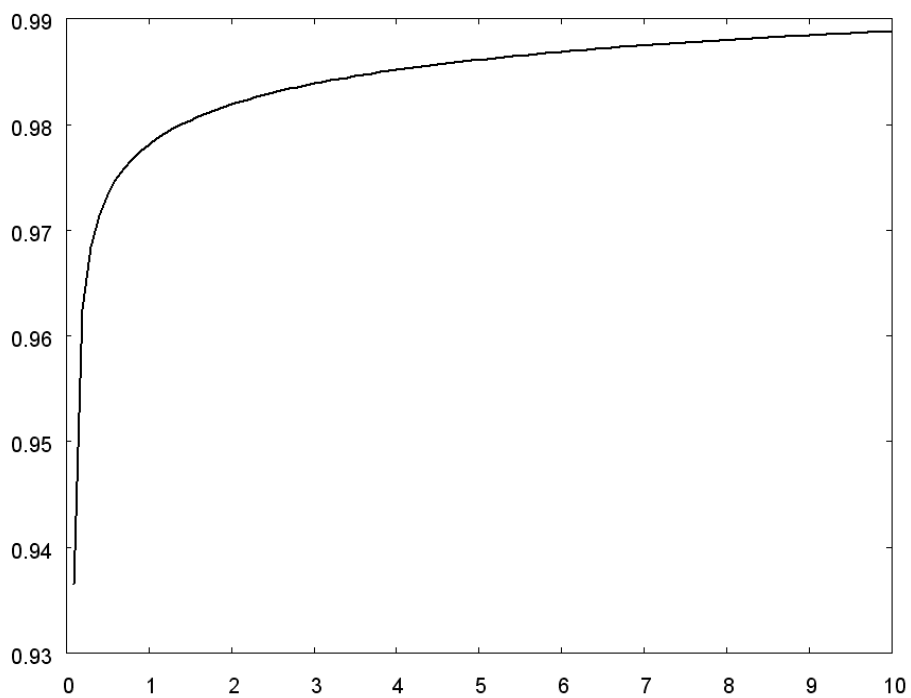
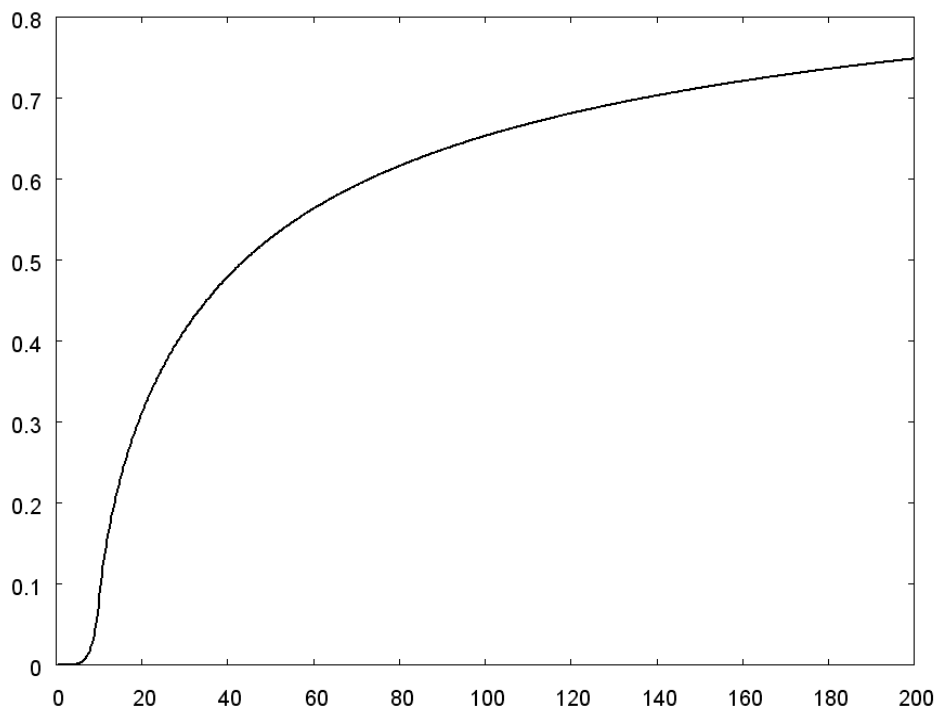


Рис. 3. Зависимость отношения B_{in} / B_q от τ ($z = 0,1$)

Рис. 4. Зависимость отношения B_m / B_q от τ ($z = 10$)

На начальной стадии взрыва, когда давление и скорость в волне велики, приближение несжимаемой жидкости может оказаться неправомерным. В этом случае можно найти индуцированное магнитное поле с помощью, например, гидродинамической модели, сформулированной выше. Подставляя выражение (20) в интеграл (24), получим

$$B_z = -\frac{3}{2} \frac{\mu_0 \sigma W}{\pi \rho_0} \frac{t}{r^3} F.$$

Условие квазистатичности для этого решения выполняется на расстояниях $r \ll \sqrt{t / \mu_0 \sigma}$. Учитывая, что сильная ударная волна существует время порядка 10^{-3} с от момента начала взрыва, получим, что условие квазистатичности выполняется только для расстояний $r \ll 100$ м. Таким образом, для вычисления магнитного поля в точках, достаточно далеких от центра взрыва, необходимо учитывать «магнитную вязкость».

Проведем численные оценки величины магнитного поля по формуле (23). Примем энергию взрыва в тротиловом эквиваленте порядка 250 кг (считаем энергию, выделяющуюся при взрыве 1 кг тротила примерно равной около $4 \cdot 10^6$ Дж), а расстояние от места взрыва до точки наблюдения 10 м. Тогда величина B_z оказывается порядка $10^{-5} F$ ($1F$ – одна фарада). Рассчитаем величину магнитного поля и установим характер его изменения согласно формуле (24) в случае, когда точка наблюдения лежит на оси z , проходящей через центр в направлении геомагнитного поля. В этой формуле $R(t)$ – радиус области, захваченной гидродинамическим движением к моменту времени t . Если точка наблюдения лежит вне этой области, т.е. ($r > R(t)$), то $\max(r, r') = r$ и интегральная формула (24) преобразуется к виду

$$B_z(r, t) = -\frac{2\mu_0 \sigma F}{3r^3} \Psi(t), \quad (28)$$

где функция, передающая зависимость поля от времени,

$$\Psi(t) = \int_{a(t)}^{R(t)} v(r', t) r'^3 dr' \quad (29)$$

никак не зависит от r . Это означает, что какова бы ни была зависимость $v(r', t)$, магнитное поле в точках, до которых еще не дошло гидродинамическое возмущение, спадает обратно пропорционально кубу расстояния от взрыва. Зависимость B_z от времени определяется деталями динамики начального этапа взрыва – зависимостью $v(r', t)$, радиусом газового пузыря $a(t)$ и радиусом фронта ударной волны $R(t)$. Например, для сильной ударной волны, для которой можно принять её параметры со следующими значениями (см. формулу (21))

$$v(r', t) = \frac{r'}{10t}, \quad a(t) = 0, \quad R(t) = At^{2/5}, \quad A = \left(\frac{225W}{2\pi\rho_0} \right)^{1/5},$$

функция, характеризующая временную изменчивость, а именно $\Psi(t)$, записанная в виде интеграла (29), принимает здесь форму $\Psi(t) = 9Wt / 4\pi\rho_0$ и оказывается, как видно, линейной функцией времени. Если измерение магнитного поля проводится в области, уже захваченной движением водных масс ($r < R(t)$), то выражение (28) преобразуется следующим образом:

$$-\frac{3B_z(r, t)}{2\mu_0\sigma F} = \frac{1}{r^3} \int_{a(t)}^r v(r', t) r'^3 dr' + \int_r^{R(t)} v(r', t) dr'.$$

Дифференцируя его по переменной r , получим

$$-\frac{3}{2\mu_0\sigma F} \frac{\partial B_z(r, t)}{\partial r} = \frac{3}{r^4} \int_{a(t)}^r v(r', t) r'^3 dr',$$

а далее, умножая найденное выражение на r^4 и еще раз продифференцировав по r , окончательно получим связь скорости волны с магнитным полем в наиболее простой форме:

$$v(r, t) = \frac{1}{2\mu_0\sigma F} \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^4 \frac{\partial B_z(r, t)}{\partial r} \right).$$

Тем самым отмечаем как важный прикладной результат морской магнитной гидродинамики, что скорость гидродинамического движения может быть найдена по измерениям индуцированного магнитного поля.

Заключение

1. Учет явления самоиндукции всегда приводит к уменьшению величины индуцированного магнитного поля, т.е. величина B_{in} оказывается меньше величины B_q .
2. При малых значениях расстояния до центра взрыва ($z < 0,5$) влияние самоиндукции не существенно – различие между полями $B_{in}(\tau)$ и $B_q(\tau)$ не превышает 5 % при всех возможных значениях τ .
3. На значительных расстояниях от центра взрыва ($z > 5$) самоиндукция существенно сказывается на величине поля. В области предвестника значение поля B_{in} значительно меньше, чем значение B_q .
4. При больших значениях z величина поля B_{in} значительно медленнее приближается к предельному значению, чем поле B_q .

ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин, Л. М. Теория поля / Л. М. Альпин. – М.: Недра, 1966. – 312 с.
2. Батыгин, В. В. Современная электродинамика. Ч. 1. Макроскопическая теория / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин. – М.: Наука, 2003. – 736 с.
3. Гульельми, А. В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и магнитосфере Земли / А. В. Гульельми // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 13. – С. 1258-1276.
4. Жмур, В. В. О вариациях электромагнитных полей, индуцированных океаническими движениями синоптического масштаба / В. В. Жмур // Геомагн. и аэроном. – 1980. – Т. XX. – № 4. – С. 693-700.
5. Конторович, В. М. О магнитогидродинамическом эффекте в океане / В. М. Конторович // Докл. АН СССР. – 1961. – Сер. геофиз. – Т. 137. – № 3. – С. 576-579.
6. Коул, Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М.: ИИЛ, 1950. – 494 с.
7. Курант, Р. Сверхзвуковое течение и ударные волны / Р. Курант, К. Фридрихс. – М.: ИИЛ, 1950. – 426 с.
8. Лапшин, В. Б. Об использовании в океанологии электромагнитных полей, индуцированных волнами Россби / В. Б. Лапшин // Геомагн. и аэроном. – 1978. – Т. XVIII. – № 4. – С. 753-755.
9. Лейбо, А. Б. Граничные условия для характеристики электромагнитного поля и связанные заряды в движущихся жидкостях / А. Б. Лейбо // Морские электромагнитные поля. – М.: ИЗМИРАН, 1976. – С. 18-25.
10. Новожилов, Ю. В. Электродинамика / Ю. В. Новожилов, Ю. А. Яппа. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
11. Положий, Г. Н. Уравнения математической физики / Г. Н. Положий. – М.: Высш. шк., 1964. – 560 с.
12. Савченко, В. Н. Электромагнитные вариации морского волнения / В. Н. Савченко, В. П. Смагин, Ю. Н. Шадрин. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1985. – 176 с.
13. Савченко, В. Н. Электродинамика океана / В. Н. Савченко. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1982. – 76 с.
14. Савченко, В. Н. Вопросы морской электродинамики / В. Н. Савченко, В. П. Смагин, Г. А. Фонарев. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 1999. – 208 с.
15. Семенов, В. Ю. Возможное влияние вариаций магнитного поля Земли на движение воды в океане / В. Ю. Семёнов, Г. А. Фонарев // Геомагн. и аэроном. – 1978. – Т. XVIII. – № 5. – С. 947-948.
16. Сёмкин, С. В. Морские электромагнитные поля. Ч. III. Инфразвуковой океанический волновод, подводные взрывы / С. В. Сёмкин, В. П. Смагин, В. Н. Савченко. – СПб.: Изд-во СПб. Политехн. ун-та, 2010. – 130 с.
17. Смагин, В. П. Вариации геомагнитного поля от морских волн у берега с наклонным дном / В. П. Смагин, В. Н. Савченко // Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований. – М.: ИЗМИРАН, 1979. – С. 234-240.
18. Смагин, В. П. Регистрация акустического сигнала в море электромагнитной антенной / В. П. Смагин, С. В. Сёмкин // Материалы XLVII Всерос. науч.-техн. конф. – Владивосток: Изд-во ТОВМИ, 2004. – С. 166-167.
19. Сочельников, В. В. Основы теории естественного электромагнитного поля в море / В. В. Сочельников. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 216 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Лисков П. А., Сарилов М. Ю.
P. A. Liskov, M. U. Sarilov

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ РЕАКТОРНОГО БЛОКА РИФОРМИНГА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРА

INTENSIFICATION OF THE REACTOR UNIT REFORMING OPERATION DUE TO THE CHANGE OF THE TECHNOLOGICAL SCHEME AND DESIGN IMPROVEMENT OF THE REACTOR

Лисков Павел Андреевич – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pasha.liskov.95@mail.ru.

Mr. Pavel A. Liskov – Master's Degree Student, Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pasha.liskov.95@mail.ru.

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Dr. habil. in Engineering, Head of Chemical Industry Machinery and Equipment Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В данной работе предлагаются способы усовершенствования работы реакторов на установке каталитического риформинга. Реакторы – основное оборудование на установке для получения целевой продукции. В рассматриваемой статье дано краткое описание принципа работы установки. Рассмотрены проблемы, из-за которых теряется эффективность работы реакторов. Предложены известные на сегодняшний день методы усовершенствования технологической схемы реакторного блока установки. Ими являются: использование более качественного, промотированного дорогими металлами катализатора; покрытие внутренней стенки реактора плакирующим слоем; снижение рабочего давления; уменьшение закоксовываемости катализатора за счет непрерывной его регенерации во время рабочего процесса установки. Как результат, установка тратит меньше времени на регенерацию катализатора и ремонт реакторов. Предлагаемые методы усовершенствования также позволяют получать продукт лучшего качества с высоким октановым числом.

Summary. This work proposes ways to improve the operation of the reactors at the catalytic reforming unit. Reactors are the basic equipment in the installation to obtain the target product. This paper briefly describes the principle of the unit operation. The problems, which defeats the efficiency of the reactors, are considered. The authors offered methods for improving the technological scheme of the reactor block installation. They are the following: the use of higher quality catalyst that is accelerated with precious metals; the reactor internal walls coating with the cladding layer; reducing working pressure; reducing of the catalyst due to continuous regeneration during the workflow installation. As a result, installation takes less time for catalyst regeneration and reactor repairing. The proposed enhancements also allow getting a better quality product with a high octane rating.

Ключевые слова: риформинг, реактор риформинга, катализатор, непрерывная регенерация, межремонтный, платформинг, дуалформинг.

Key words: reforming, reactor of the reforming, continuous regeneration, overhaul, plat forming, dualforming.

УДК 650.98

Введение

Каталитический риформинг – это процесс, который повышает содержание аренов, для их образования проходит каталитическая реакция в реакторах установки с образованием ароматических углеводородов, происходит переработка лигроиновых и бензиновых фракций нефти с целью

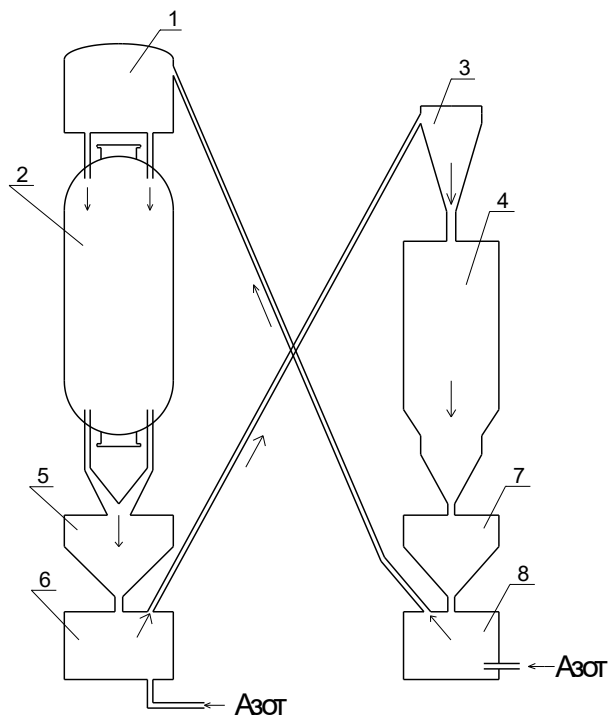
получения высокооктанового неэтилированного компонента автобензина, ароматических углеводородов и водородсодержащего газа (ВСТ) для процессов гидроочистки, гидрокрекинга, изомеризации. Реакция протекает на алюмоплатиновых катализаторах в смеси с дорогими металлами (Pt, Re, Ir и др.), температура процесса 480...520 °С, давление 15...35 кгс.

Риформинг – широко применяемый процесс в нефтепереработке для производства высокооктановых компонентов товарных автомобильных бензинов в России и во всем мире, т.к. для современных автомобильных двигателей требуется высокооктановое топливо. Совершенствование реакторов и технологической схемы блока реакторов установки позволит снизить время на регенерацию катализатора, продлить работу реакторов и даст высокооктановое топливо.

Пути совершенствования реакторов риформинга

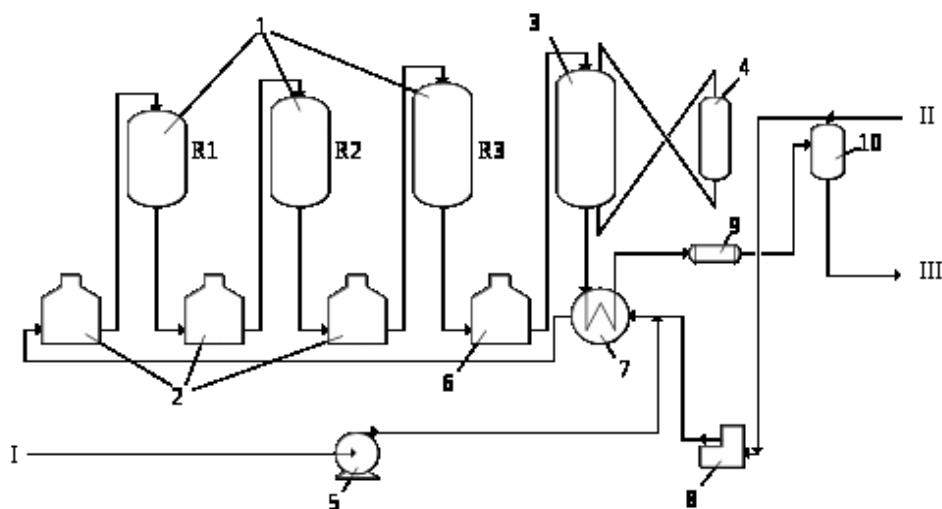
1. Эффективным способом увеличения времени работы реакторного блока является непрерывная регенерация катализатора, это лучший способ на сегодняшний день продлить межремонтный пробег установки, в результате которого увеличиваются качество и объем выпускаемой продукции на установке [4]. К сожалению, в нашей стране большинство установок риформинга имеет стационарный (неподвижный) слой катализатора, который при закоксовывании необходимо восстанавливать с остановкой установки на 20...40 суток в год [5]. Повысить межремонтный пробег реактора можно и простым способом, увеличив объем катализатора или использовав дорогие катализаторы, но проблему коксуемости катализатора это не решит, а ужесточение режима (увеличение температуры) приведет в повышенному отложению кокса на катализаторе [4].

Рациональное решение – непрерывная регенерация катализатора во время рабочего процесса установки. Для этого рядом с 4-м реактором устанавливают регенерационный аппарат (см. рис. 1). Целесообразно регенерировать именно последний реактор, т.к. в нем содержится половина катализатора от всего реакторного блока в целом и происходит наибольшая дезактивация катализатора из-за высокого содержания аренов в среде реакций и жесткого установленного режима для реактора. Процесс регенерации разработан Французским институтом нефти и носит название «Дуалформинг» (см. рис. 2).



1, 8 – бункер восстановленного катализатора; 2 – реактор Р-5; 3, 5 – сборочное устройство закоксованного катализатора; 4 – регенератор; 6 – бункер закоксованного катализатора; 7 – сборочное устройство восстановленного катализатора

Рис. 1. Технологическая схема непрерывной регенерации катализатора последнего реактора



линии: I – сырье; II – ВСГ; III – нестабильный риформинг-бензин;
 1 – реакторы риформинга; 2 – печи, 3 – непрерывно регенерируемый реактор; 4 – регенератор;
 5 – насос для перекачки сырья; 6 – установленная новая печь; 7 – теплообменник сырье/продукт;
 8 – компрессор рециркуляционный; 9 – ВХ; 10 – сепаратор

Рис. 2. Принципиальная технологическая схема процесса «Дуалформинг»

Регенератор 4 – это аппарат, где потоки газов для осуществления реакции вводятся в реактор радиально. Регенератор имеет 3 технологических уровня по всей высоте аппарата. В верхней части (содержание кислорода менее 1 % моль) происходит выжиг кокса с катализатора, в средней (содержание кислорода составляет 10...20 %) производят подачу хлорорганических соединений, в результате происходит окислительное хлорирование катализатора, а в нижней части катализатор прокалывают сухим воздухом [5].

При снижении октанового числа (ОЧ) и закоксовывании катализатора с нижних штуцеров реактора 4 ссыпается отработанный катализатор, проходит сборочное устройство 5 для равномерной подачи катализатора в бункер 6 и транспортировки его в регенератор 4. Поступив в бункер, катализатор транспортируется азотом в бункер 3, откуда поступает в регенератор, где происходит выжиг кокса и восстановление катализатора. Далее свежий катализатор через сборочное устройство 7 поступает в бункер 8, транспортируется с помощью азота в бункер 1. Оттуда по мере удаления закоксованного катализатора сразу засыпается свежий, тем самым образовав замкнутый цикл: реактор – регенератор – и снова реактор. По мере удаления закоксованного катализатора с реактора сразу же засыпается восстановленный [1].

С непрерывной регенерацией появляется возможность:

- регулировать скорость движения катализатора по рабочей зоне реактора;
- достичь катализат с октановым числом более 100 пунктов;
- снизить рабочее давление в реакторе и увеличить температуру реакции без повышенного коксообразования;
- увеличить селективность ароматизации;
- использовать в качестве сырья более широкую бензиновую фракцию;
- увеличить выход ВСГ с одновременным повышением его качества.

Существует еще более совершенная установка с непрерывной регенерацией под названием «Платформинг», которая разработана фирмой «UOP» (США). Процесс «Платформинг» дает стабильный выход бензина высокого качества с минимальным содержанием бензола и высоким ОЧ (103...105), к тому же качество бензина не снижается со временем работы. Реакторы в такой схеме располагаются на одной оси друг над другом. Переход на процесс «Платформинг» требует полной реконструкции всего реакторного блока, что невыгодно экономически и окупается только на крупных НПЗ (в нашей стране такую технологию имеет ОАО «ЛУКОЙЛ Нижегороднефтеоргсин-

тез»). Для небольших заводов, например для Комсомольского НПЗ, подойдет процесс «Дуалформинг» с установкой регенератора рядом с последним реактором без реконструкции и дополнительного оборудования [5].

2. Вторым способом служит усовершенствование конструкции самого реактора. Старые реакторы на большинстве отечественных НПЗ изготовлены в период 1960 – 1980-х гг., такие реакторы не имеют эффективной защиты внутренних стенок от водородной коррозии. Использование для защиты таркетбета неэффективно, т.к. он трескается и разрушается при температурных воздействиях и не дает эффективной защиты аппарата. Решением служит покрытие внутренних стенок реактора легированной сталью марок 12X18H10T, 08X18H10T [2].

Современные реакторы имеют радиальный (от периферии к центру) ввод газосырьевой смеси (см. рис. 3), такое техническое решение позволило увеличить объем загружаемого катализатора и рациональнее использовать его работу без применения дополнительных элементов (крышек верхних, гибких мембран) (см. рис. 4).



Рис. 3. Распределение газосырьевой смеси по реактору



Рис. 4. Вид внутри реактора

3. Катализатор риформинга – основной компонент для протекания реакций в реакторе. Дальнейшее совершенствование риформинга достигается использованием полиметаллических катализаторов, которые представляют собой соединение Pt + Re, и промоторов, которые равномерно распределены по всей поверхности носителя – активного Al_2O_3 [3].

По сравнению с моно- и биметаллическими катализаторами, доля которых на отечественных НПЗ составляет около 40 %, полиметаллический имеет повышенную активность, селективность, прочность и позволяет снизить давление в реакторе, уменьшив тем самым закоксовывание катализатора [3]. Как результат – увеличенный межремонтный пробег установки и выход продукта с высоким октановым числом. Недостаток полиметаллического катализатора в его высокой стоимости, но срок службы составляет 5...6 лет [1]. Наиболее значимыми производителями являются компания «ЮОП» и «ФИН». Приведем в табл. 1 для сравнения основные характеристики катализаторов, используемых на НПЗ России.

Из данных табл. 1 следует, что современные отечественные катализаторы отличаются высокой поверхностью, объемом пор и хорошей прочностью. Импортные катализаторы характеризуются меньшими объемом пор, но большим насыпным весом и повышенной прочностью.



Таблица 1

Применяемые катализаторы на НПЗ России

Марка катализатора	Содержание, % (по массе)		$S_{уд}$, м ² /г	Объем пор, см ² /г	D , мм	Насыпной вес, кг/ м ³	Коэффициент прочности, Н/мм
	Pt	Re					
КР-108У (РБ-22У)	0,36	0,25	250	0,5	2,8	700	120...150
	0,26	0,45					
ПР-51	0,25	0,30	250	0,65	2,8	660	130...150
REF-23	0,25	0,40	250	0,8	1,8	700	120...140
R-56	0,25	0,40	180	0,38	1,6	838	-
RG-482	0,30	0,30	210	0,61	1,6	720	-
PR-9	0,25	0,25	200	0,55	2,1	720	200...220

Анализ существующих тенденций в разработке новых катализаторов риформинга показывает, что прогресс в повышении технической эффективности катализаторов состоит в переходе от биметаллических к триметаллическим системам с химической модификацией и оптимизацией текстурных параметров носителя, оптимизацией стадий прокаливания, восстановления и сульфидирования катализаторов. Разработка новых перспективных версий катализаторов риформинга осуществляется в Омском филиале ИК СО РАН.

Вывод

За последние 77 лет с момента первого запуска установки риформинга произошел существенный скачок в способах усовершенствования работы реакторов. Из всех имеющихся вариантов наиболее эффективным является процесс с непрерывной регенерацией катализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов, С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа: учеб. пособие для вузов / С. А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.
2. Гуреев, А. А. Производство высокооктановых бензинов / А. А. Гуреев, Ю. М. Жоров, Е. В. Смидович. – М.: Химия, 1981. – 224 с.
3. Ермакова, Ю. И. Нанесенные металлические катализаторы превращения углеводородов / Ю. И. Ермакова. – М.: Новосибирск, 1978. – 78 с.
4. Разработка процесса каталитического риформинга с непрерывной регенерацией катализатора / Б. Б. Жарков, Р. Н. Шапиро, Ю. М. Краев, А. П. Федоров // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1999. – № 8. – С. 4-8.
5. Белый, С. А. Основные положения эксплуатации установки каталитического риформинга / С. А. Белый. – М.: Омск, 2006. – 184 с.

Верещагин В. Ю., Мокрицкий Б. Я., Верещагина А. С., Кравченко Е. Г.
V. Yu. Vereshchagin, B. Ya. Mokritskii, A. S. Vereshchagina, E. G. Kravchenko

**ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЖУЩЕМ КЛИНЕ**

**THE INFLUENCE OF THE CUTTING TOOLS COVER ON DISTRIBUTION
OF THE CUTTING WEDGES TENSION**

Верещагин Владислав Юрьевич – старший преподаватель кафедры информационных, сервисных и общетехнических дисциплин Новосибирского государственного педагогического университета (Россия, Новосибирск); тел. 89134694095. E-mail: Klirickv@gmail.com.

Mr. Vladislav Yu. Vereshchagin – Senior Teacher, Information, Service and General Technical Sciences Department, Novosibirsk State Pedagogical University (Russia, Novosibirsk); tel. 89134694095. E-mail: Klirickv@gmail.com.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 89141757562. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Dr. habil. in Engineering, professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 89141757562. E-mail: boris@knastu.ru.

Верещагина Александра Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Новосибирского государственного технического университета (Россия, Новосибирск); тел. 89134694337. E-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru.

Ms. Alexandra S. Vereshchagina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering, Novosibirsk State Technical University (Russia, Novosibirsk); tel. 89134694337. E-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Ms. Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. Рассмотрен процесс резания инструментом с нанесенными на него покрытиями. Проведены исследования напряженного состояния режущего инструмента с покрытиями в процессе резания. Показана взаимосвязь силы резания с напряжениями, возникающими в режущем инструменте. Проведена оценка работоспособности режущего инструмента с покрытиями.

Summary. The process of cutting with a coated tool is considered. Investigations of the stressed state of the cutting tool with coatings during the cutting process are carried out. The interaction of the cutting force with the stresses arising in the cutting tool is shown. The efficiency of the cutting tool with coatings was evaluated.

Ключевые слова: режущий инструмент, процесс резания, период стойкости, многослойные покрытия, напряжения, моделирование.

Key words: cutting tools, the cutting process, a period of wait-bones, multilayer coatings, stresses, modeling.

УДК 621.91.01

Введение

Одним из эффективных методов повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности покрытий, как однослойных, так и многослойных [1; 2]. Эффективность их использования различна, прирост работоспособности инструмента можно

оценить лишь на основании экспериментальных исследований. Надёжных методик прогнозирования работоспособности режущего инструмента с покрытиями нет. В силу этого актуальной задачей является разработка методики прогнозирования работоспособности на этапе проектирования покрытия. В том числе важной является разработка методики проектирования покрытия под заданные условия эксплуатации режущего инструмента.

Методологическая концепция

Использован следующий методологический подход (концепция):

1. Работоспособность (например, период износостойкости) металлорежущего инструмента тем выше, чем меньше сила резания.
2. Сила резания прямо пропорционально связана с напряжениями, возникающими в режущем инструменте.
3. Следовательно, если обеспечить в режущем инструменте напряжения меньшей величины, то следует ожидать большей его работоспособности.
4. Управлять величиной напряжений можно за счёт применения тех или иных покрытий на субстрате инструментального материала, т.е. за счёт архитектурирования [3] покрытия под заданные условия его эксплуатации.
5. Проведение компьютерного моделирования инструментального материала (субстрат + покрытие) на этапе его разработки. В основе такого моделирования может лежать стремление обеспечить минимальный уровень напряжений, что должно привести к соответствующему приросту работоспособности инструмента.

Проверке адекватности этой концепции посвящена данная работа.

Зависимость между силой резания и максимальными напряжениями в режущем клине инструмента получена С. И. Петрушиным [4; 5]. Она описана следующим выражением с прямо пропорциональной зависимостью максимальных напряжений от силы резания ($\sigma_{\max} \sim P$):

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \dots]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + \dots \frac{\cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta - \beta \cdot \sin \Theta)}{+ (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2}],}$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания; γ – передний угол; α – главный задний угол; P_z – главная составляющая сила резания; r , Θ – полярные координаты.

При изучении распределения напряжений в режущем клине инструмента рассматривали контактные напряжения σ_z и σ_y , действующие в направлении, соответственно параллельном передней поверхности и перпендикулярном к ней.

Исследование напряженного состояния режущего клина проводилось компьютерным моделированием с использованием пакета программ ANSYS.

Рассматривали следующие инструментальные материалы: субстрат – твёрдый сплав марки ВК8; однослойное покрытие из нитрида титана TiN толщиной 5 мкм; однослойное композиционное покрытие (TiAl)N толщиной 5 мкм; трехслойное покрытие Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм; трёхслойное покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм; трёхслойное покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм.

Именно эти инструментальные материалы выбраны в силу того, что по ним имеются сведения в литературе, например, отдельные результаты приведены А. А. Верещакой в работе [6].

Поля (картины распределения) напряжений для таких инструментальных материалов показаны на рис. 1 и 2. Числа на полях напряжений показывают линию напряжений в мегапаскалях.

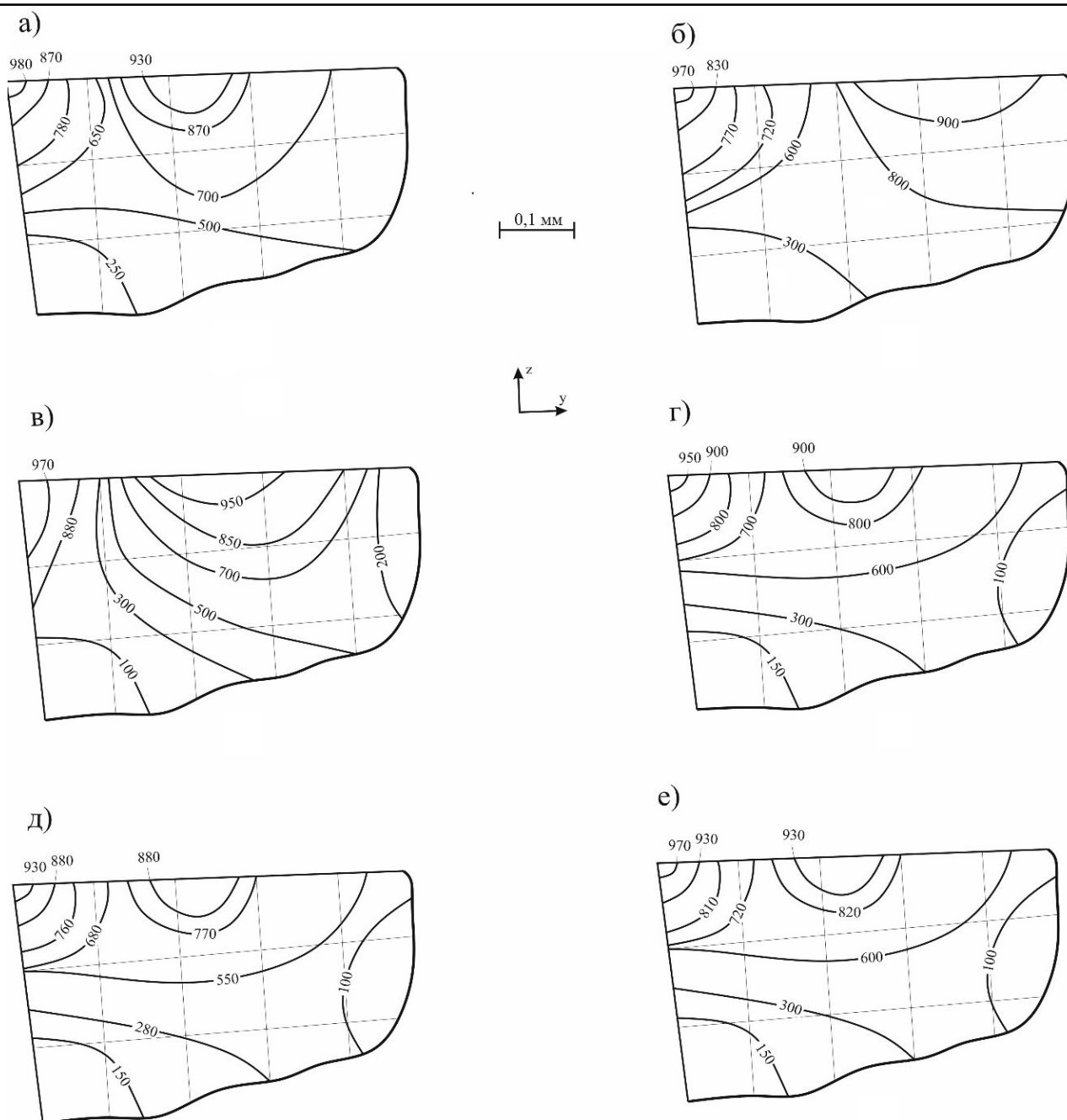


Рис. 1. Поля напряжений σ_z в режущем клине твердосплавного инструмента марки ВК8:
 а – без покрытия; б – с однослойным покрытием TiN толщиной 5 мкм; в – с покрытием (TiAl)N толщиной 5 мкм; г – с трехслойным покрытием Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм; д – с трёхслойным покрытием Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм; е – с трёхслойным покрытием Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм

Для проверки представленной гипотезы проведено сопоставление результатов вычисления эквивалентных напряжений с экспериментальными данными [7] по стойкости режущего инструмента с нанесёнными на него покрытиями (см. рис. 3).

Под эквивалентными напряжениями понимаем

$$\sigma_{\text{эк}} = \sqrt{\sigma_{z \text{ max}}^2 + \sigma_{y \text{ max}}^2},$$

где σ_{zmax} – расчетные максимальные напряжения по передней поверхности режущего клина;
 σ_{ymax} – расчетные максимальные напряжения по задней поверхности режущего клина.

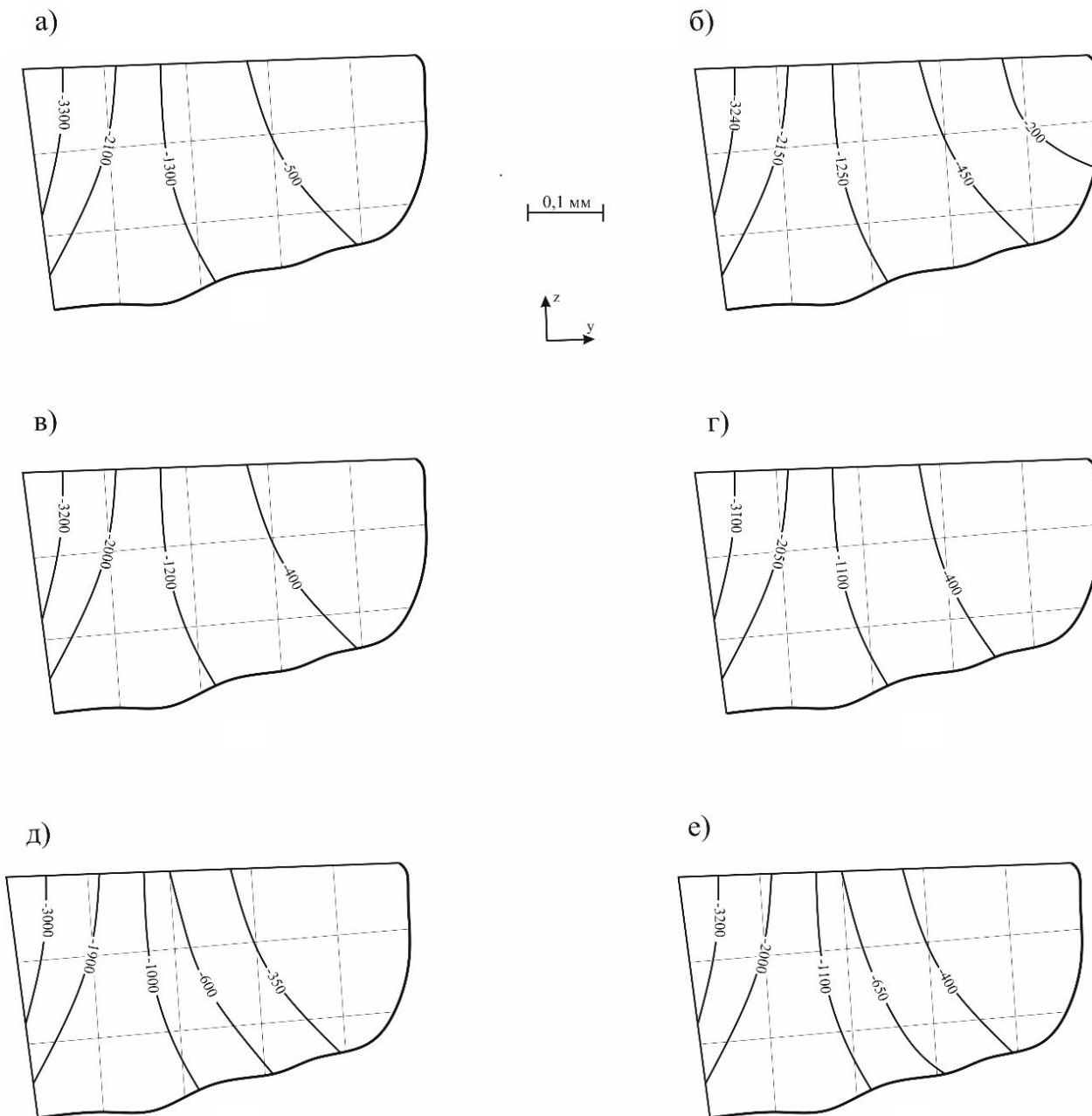


Рис. 2. Поля напряжений σ_y в режущем клине твердосплавного инструмента марки ВК8:
 а – без покрытия; б – с однослойным покрытием TiN толщиной 5 мкм; в – с покрытием (TiAl)N толщиной 5 мкм; г – с трехслойным покрытием Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм;
 д – с трёхслойным покрытием Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм; е – с трёхслойным покрытием Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм

Стойкостные исследования проводились при продольном точении заготовок из стали 12Х18Н10Т. Результаты взяты для скорости резания $V = 70$ м/мин и подачи $S = 0,1$ мм/об.

Сопоставление экспериментальных данных по износостойкости инструмента с результатами моделирования максимальных эквивалентных напряжений показало обратную зависимость стойкости и эквивалентных напряжений, что означает увеличение стойкости инструмента как следствие снижения эквивалентных напряжений.

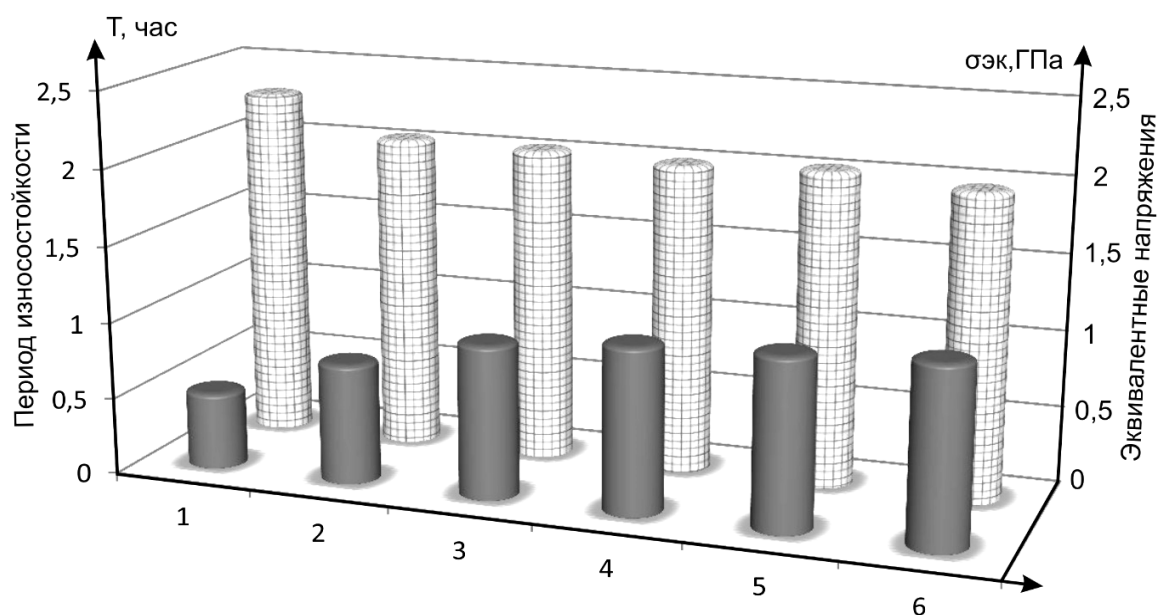


Рис. 3. Сопоставление стойкости режущего инструмента (первый ряд) и максимальных величин эквивалентных напряжений (второй ряд): 1 – VK8; 2 – TiN толщиной 5 мкм; 3 – (TiAl)N толщиной 5 мкм; 4 – Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм; 5 – Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм; 6 – Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм

Выводы

1. Применение покрытий изменяет картину полей напряжений и снижает на 13 % величину максимальных напряжений из-за снижения силы резания.
2. Применяемое программное обеспечение позволяет учесть изменение архитектуры покрытия (колонны 5 и 6 на рис. 3, отличающиеся толщиной покрытия на 0,4 мкм), что влечёт за собой изменение величин максимальных напряжений на 3 % (50 МПа).
3. Кажущаяся незначительность (в 1,16 раз) изменения величин максимальных напряжений у инструмента с покрытием и без покрытия влечёт за собой существенное изменение (3,2 раза) работоспособности инструментальных материалов.
4. Для указанных условий эксплуатации наиболее эффективно применение покрытия Ti+TiN+(TiAlCr)N при общей толщине 10 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Табаков, В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – М.: Машиностроение, 2008. – 312 с.
2. Верещака, А. С. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента / А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, В. П. Табаков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2. – С. 18-19.
3. Сотова, Е. С. Керамические режущие инструменты / Е. С. Сотова, А. А. Верещака, А. С. Верещака. – М.: Изд-во ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 148 с.
4. Петрушин, С. И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов: дис. ... д-ра техн. наук / Петрушин С. И. – М., 1995. – 307 с.
5. Петрушин, С. И. Оптимальное проектирование формы режущей части лезвийных инструментов: учеб. пособие / С. И. Петрушин, И. М. Бобрович, М. А. Корчуганова. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – 91 с.
6. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method / A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, A. D. Batako, B. Ja. Mokritskii, A. Y. Aksenenko, N. N. Sitnikov // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2017. – Vol. 7. – P. 1-13.
7. Чихранов, А. В. Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Чихранов А. В. – Ульяновск, 2006. – 314 с.



Ким В. А., Мокрицкий Б. Я., Самар Е. В., Якубов Ч. Ф.
V. A. Kim, B. Ya. Mokritskii, E. V. Samar, Ch. F. Yakubov

АДГЕЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

ADHESIVE PROCESSES OF CONTACT INTERACTION WHEN CUTTING MATERIALS

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Самар Елизавета Владимировна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mrs. Elizaveta V. Samar – a post-graduate student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Якубов Чингиз Февзиевич – кандидат технических наук, доцент, ректор Крымского индустриально-педагогического университета (Россия, Симферополь).

Mr. Chingiz F. Yakubov – PhD of Engineering, Rector of the Crimean Industrial and Teaching University (Russia, Simferopol).

Аннотация. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании металлов определяют изнашивание и стойкость режущего инструмента. Пластическая деформация рабочих поверхностей режущего инструмента при резании сопровождается упрочнением и развитием центров адгезионной активности, представляющих микро- и мезомасштабные зоны с высокой плотностью дефектов кристаллического строения. Адгезионную активность таких центров можно снизить адсорбцией компонентов смазочно-охлаждающей жидкости и образованием островковых наростов из продуктов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов. Островковые наросты представляют собой особый вид вторичных структур на поверхности режущего инструмента, формирование которых идет по синергетическому алгоритму.

Summary. Adhesive processes of contact interaction when cutting metals define wear and firmness of the cutting tool. Plastic deformation of working surfaces of the cutting tool when cutting is followed by center development of adhesive activity representing micro and mesolarge-scale zones with a high density of defects in a crystal structure. Adhesive activity of such centers can be reduced by adsorption of components of lubricant cooling liquid and formation of insular outgrowths from products of dispersion of the processed and tool materials. Insular outgrowths represent a special type of secondary structures on a surface of the cutting tool which formation goes according to the synergetic algorithm.

Ключевые слова: адгезия, дефекты кристаллического строения, поверхностная энергия, диффузия, наросты, изнашивание, твердость, стойкость инструмента.

Key words: adhesion, defects of a crystal structure, superficial energy, diffusion, outgrowths, wear, hardness, firmness of the tool.

УДК 621.9.026

Введение

Доминирующая роль в изнашивании режущего инструмента отводится адгезионным процессам, так как напряжения на фактических участках контактного взаимодействия могут превышать предел прочности обрабатываемого и предел текучести инструментального материалов, и все это происходит на фоне высоких температур и скоростей деформаций. Под адгезией понимают совокупность механизмов образования связей между поверхностными слоями разнородных твердых тел, приведенных в соприкосновение. С физической точки зрения адгезия определяется силами межмолекулярного взаимодействия, ионной, ковалентной, металлической и другими типами связей. Адгезия как явление термодинамически обоснована наличием избыточной энергии в поверхностных слоях и стремлением к самопроизвольной ее минимизации. Образование адгезионных связей при контакте двух твердых тел приводит к снижению суммарной поверхностной энергии, уменьшению энергии Гиббса и повышению энтропии системы контактного взаимодействия.

Адгезия является термически активируемым явлением и источником выделения тепла в результате пластической деформации контактных слоев и диссипации внутренней энергии. Образованию адгезионных связей всегда сопутствуют структурные превращения в очагах схватывания. Высокие температуры и их градиенты, скорости нагрева и охлаждения, сопутствующие адгезии, приводят к развитию закалочных структур.

Первичные очаги адгезионного схватывания образуются в зонах с высокой внутренней энергией, которые локализуются в местах скопления поверхностных дефектов кристаллического строения разных масштабных уровней. Адгезия твердых тел начинается с образования на контактирующих поверхностях микролокальных зон с разной электронной плотностью, между которыми возникают обменные электронные процессы и кулоновские силы, определяющие прочность первичных адгезионных связей. Поля упругих напряжений являются первопричиной наведения и разделения локальных электростатических зарядов, поэтому поверхностные дефекты кристаллического строения рассматриваются как потенциальные очаги образования адгезионных связей. Возникающие первичные связи становятся активными каналами массопереноса, и это способствует образованию химических и других соединений, приводящих в конечном итоге к повышению сил адгезии [1].

Динамика развития очагов адгезионного взаимодействия объясняет многие явления, сопутствующие резанию металлов. Снижение активности адгезионных центров происходит за счет взаимодействия поверхностных дефектов кристаллического строения с продуктами разложения СОТС, в состав которых входят поверхностно-активные вещества, антифрикционные присадки и различные соли, повышающие теплофизические свойства масляной или водной основы. При осаждении продуктов разложения СОТС на участках с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения формируются более прочные адсорбционно-адгезионные слои. В результате поверхностная энергия вокруг дефекта кристаллического строения уменьшается и понижается ее активность как адгезионного центра. Образование устойчивого адсорбционно-адгезионного слоя переводит сухое трение ювенильных поверхностей в режим граничного трения.

В статье приведены результаты исследования образования и развития активности центров адгезионной активности на рабочих поверхностях режущего клина и их влияние на процессы, сопутствующие резанию металлов.

Механизмы снижения активности адгезионных центров

Рассмотрим основные феноменологические соотношения адгезионного процесса. Адгезия твердых тел характеризуется энергией и силой взаимодействия.

Суммарная поверхностная энергия при контакте твердых тел представляется в виде

$$E_{\text{пов}} = \sigma_1(\infty) + \sigma_2(\infty) - \sigma_{12}(h),$$

где $E_{\text{пов}}$ – суммарная поверхностная энергия; $\sigma_1(\infty)$ и $\sigma_2(\infty)$ – поверхностные энергии уединенных твердых тел, когда они располагаются на бесконечном расстоянии друг от друга; $\sigma_{12}(h)$ – межфазная энергия взаимодействия двух поверхностей твердых тел, находящихся на расстоянии h друг от друга.

Энергия адгезии определяется как избыток поверхностной энергии при бесконечном удалении твердых тел друг от друга, или

$$E_a = -\sigma_{12}(h).$$

Сила адгезионного взаимодействия различных материалов равна

$$F_a = -\frac{dE_a}{dh} = \frac{d\sigma_{12}(h)}{dh}.$$

Отрицательный знак означает, что сила адгезионного взаимодействия приводит к снижению избыточной поверхностной энергии. То есть чем выше сила адгезии между соприкасающимися твердыми телами, тем больше энергии затрачивается на ее формирование и меньше величина остаточной энергии адгезии. Из этого также следует, что чем прочнее адгезионная связь между покрытием и подложкой, тем ниже адгезионная активность такого образования.

При образовании на поверхности дислокаций и других дефектов кристаллического строения за счет внешнего энергетического воздействия повышается реальная площадь поверхности, а это в свою очередь приводит к росту избыточной поверхностной энергии. Наведение поверхностных дефектов кристаллического строения понижает энтропию твердого тела и повышает адгезионную активность поверхности. Энергия адгезии будет складываться

$$E_a = -\sigma_{12}(h) - E_p,$$

где E_p – энергия взаимодействия контактирующих твердых тел, имеющих поверхностные дефекты кристаллического строения.

Тогда сила адгезионного взаимодействия с учетом поверхностных дефектов кристаллического строения определится

$$F_a = \frac{d\sigma_{12}(h)}{dh} + \frac{dE_p}{dh}.$$

С повышением плотности поверхностных дефектов кристаллического строения твердых тел сила их адгезионного взаимодействия возрастает. Из этого также следует, что деформационно-упрочненная поверхностная структура обладает более высокой адгезионной активностью [2; 3]. Эта закономерность широко используется при нанесении различных покрытий путем предварительной поверхностно-пластической деформации. Сформированная таким образом поверхностная структура с высокой плотностью дислокаций обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с основой, наносимого ионно-вакуумным напылением [2].

Структурная организация адгезионного центра представляет собой совокупность поверхностных дефектов кристаллического строения, объединенных в кластер микро- или мезомасштабного уровня. В поликристаллических материалах адгезионными центрами могут быть скопления дислокаций, узлы пересечений границ зерен и т.п. Границы зерен представляют собой двумерные дефекты кристаллического строения, состоящие из дислокаций и аморфной фазы, обладающие высокой внутренней энергией. На локальных участках зеренных границ с высокой кривизной внутренняя энергия принимает наибольшие значения. К таким участкам относят пересечения границ и области стыковок нескольких зерен [4; 5].

Ювенильная поверхность твердого тела, по сути, представляет собой макромасштабный дефект кристаллического строения. Она характеризуется повышенной величиной поверхностной энергии и высокой плотностью дефектов кристаллического строения. Такая поверхность обладает высокой адгезионной активностью и при контакте с внешней средой мгновенно покрывается адсорбционным слоем. Микрошероховатость и выходы дислокаций на поверхность образуют макромасштабные зоны высокой кривизны с повышенной поверхностной энергией и адгезионной активностью. Наличие таких микрзон обеспечивает высокую поверхностную диффузию. Поверхностная диффузия отличается более высоким коэффициентом диффузии по сравнению с объемной, которая возрастает с повышением температуры [7]. Область проявления поверхностной диф-

фузии распространяется на зоны упругого дискретного и сплошного пластического контакта при резании металлов.

Диффузаны, взаимодействуя с поверхностными дефектами кристаллического строения, приводят к снижению их внутренней энергии на величину энергии связи инородных атомов и вакансий с дефектами. Уменьшение внутренней энергии поверхностных дефектов кристаллического строения приводит к понижению общего уровня поверхностной энергии, и это является главным фактором падения адгезионной активности поверхности твердого тела.

В результате наведения поверхностных дефектов кристаллического строения и осаждения на них инородных атомов, вакансий и других ноль-мерных дефектов энергия адгезии может быть выражена следующей зависимостью:

$$E_a = -\sigma_{12}(h) - E_p + E_b,$$

где E_b – энергия взаимодействия поверхностных дефектов кристаллического строения с инородными атомами, вакансиями и другими ноль-мерными дефектами.

Наросты как фактор снижения активности адгезионных центров

Высокая энергия адгезионных центров на рабочих поверхностях режущего клина способствует образованию островковых наростов из фрагментированных продуктов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов. Слои, состоящие из таких наростов, можно рассматривать как особый вид вторичных поверхностных образований, имеющих наноструктурную организацию, которые резко снижают активность адгезионных центров, повышают прочность и износостойкость рабочих поверхностей инструмента. Образование и развитие таких структур реализуются по синергетическому алгоритму.

В отличие от традиционного нароста, который образуется у вершины режущего лезвия, островковые наросты представляют собой отдельный вид адгезионных структурных образований, распределенных по всей рабочей поверхности режущего клина. Количество островковых наростов, отнесенное к единичной площади поверхности, назовем плотностью островковых наростов. Плотность островковых наростов пропорциональна характеру распределения нормальных напряжений, так как сжимающие усилия оказывают наиболее сильное влияние на активность образования адгезионных связей между инструментальным и обрабатываемым материалами.

По мере роста островковых наростов они могут сливаться, образуя крупный сплошной нарост. Вероятность появления таких наростов наиболее высока у режущей кромки, где наблюдается традиционный нарост треугольного профиля. Традиционный нарост образуется в определенном диапазоне скоростей резания, принимая определенные размеры и форму в соответствии с их химическим составом и деформационными свойствами обрабатываемого материала. Традиционный нарост может периодически отрываться, но его островковая основа сохраняется.

Сплошность островковых наростов принимает различные значения на отдельных участках контакта режущего клина с обрабатываемым материалом. На рис. 1 приведены фотографии рабочих поверхностей режущего клина на передней поверхности резца из ВК8 после точения стали 20 всухую. По представленным фотографиям видно, что с удалением от режущего лезвия сплошность островковых наростов снижается, а сами наросты уменьшаются по площади.

Строение крупных наростов, зафиксированных в зоне сплошного пластического контакта, несет следы вязкопластического течения, характерного для высокотемпературного процесса трения. Сами наросты имеют слоистое строение, которое формируется путем намазывания микрофрагментов срезаемого слоя, вырванного из сходящей стружки (см. рис. 2).

Из представленных фотографий видно, что в состав наростов и налипов входят продукты диспергирования твердого сплава. Светлые участки указывают на наличие зон со статическим электричеством, характерным для диэлектрических и полупроводниковых оксидных соединений. Наросты формируются в результате интенсивных высокотемпературных пластических деформаций нано- и микромасштабных фрагментов диспергирования обрабатываемого и инструментального материалов, в которых отсутствует зеренная структурная организация [10]. Интенсивная пластическая деформация фрагментированных элементов, из которых формируется нарост, не вызывает генерацию дислокаций и других линейных дефектов кристаллического строения из-за отсут-

ствия в их структуре кристаллитов, и, как следствие этого, не приводит к развитию потенциальных очагов адгезионной активности. Это обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую износостойкость наростов в контактном взаимодействии при резании металлов.

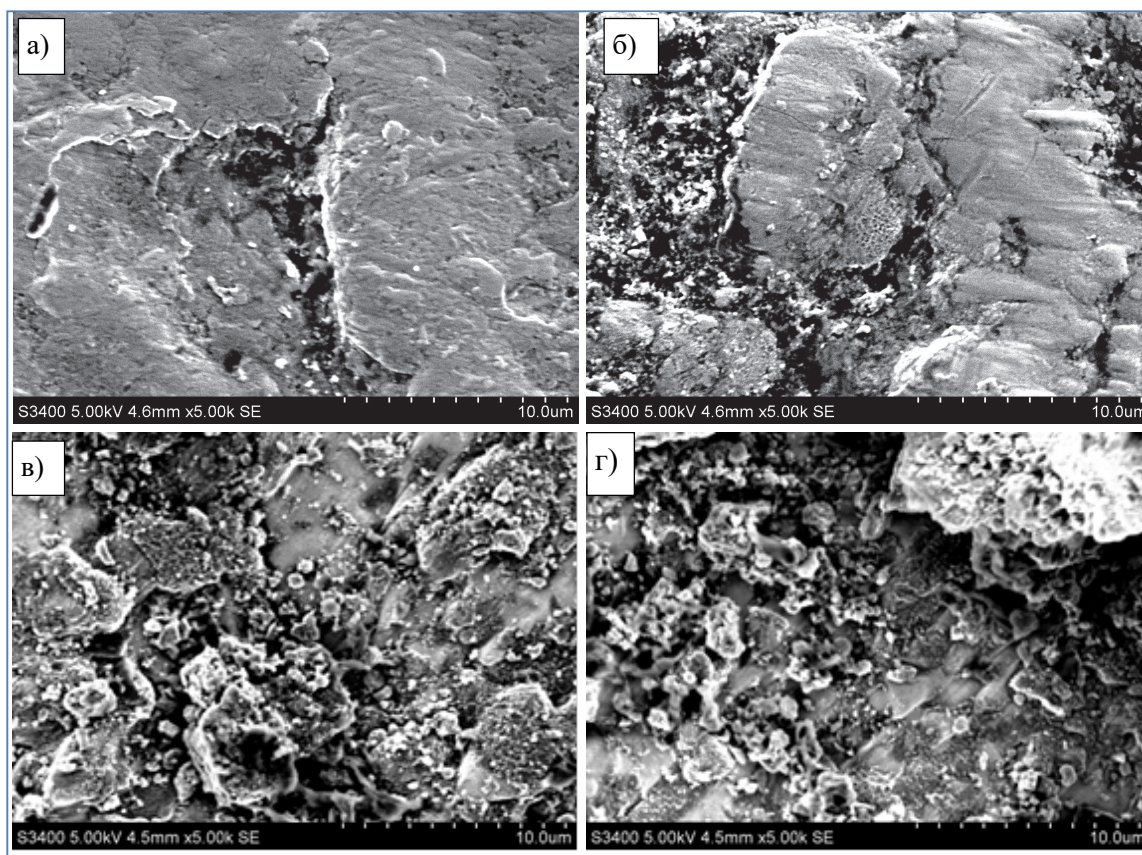


Рис. 1. Морфология передней поверхности реза из BK8 после точения стали 20:
 а – вблизи режущего лезвия; б – середина зоны пластического контакта;
 в – середина зоны упругого контакта; г – конечная зона упругого контакта

В зоне дискретного контакта проникновение продуктов разложения СОТС реализуется в основном за счет капиллярных процессов и поверхностной диффузии. Образующиеся разрывы между стружкой и передней поверхностью режущего клина представляют собой пустоты, внутри которых создается давление значительно ниже атмосферного, и это вызывает засасывающий эффект, облегчающий процесс проникновения компонентов внешней среды и СОТС. Характер распределения наростов и налипov зависит от активного участия внешней среды и СОТС в трибологических процессах в зоне дискретного контакта.

В зоне пластического контакта понятие сплошности носит относительный характер. Строе-ние сплошного контакта состоит из устойчивой основы, покрывающей переднюю поверхность режущего клина сплошным слоем. Форма и размеры нароста оптимизируют геометрию режущего клина и минимизируют энергетические затраты на процесс стружкообразования [10]. Сходящая стружка скользит по верхнему слою наростов, при этом условия фрикционного взаимодействия близки к режимам внутреннего трения.

Высокая температура и ее градиент активизируют диффузионные процессы между наростом и инструментальным материалом. Взаимная диффузия элементов инструментального и обрабатываемого материалов через основание нароста повышает силу сцепления, но при этом в инструменте формируется подповерхностный слой, обедненный легирующими элементами. При эксплуатации твердосплавного режущего инструмента диффузии в большей степени подвержена кобальтовая связка, приводящая к ослаблению связи между карбидными зернами. Разрыв отдель-

ных адгезионных связей происходит по этому слою, и оторвавшийся нарост уносит с собой некоторую часть инструментального материала или частицы износа.

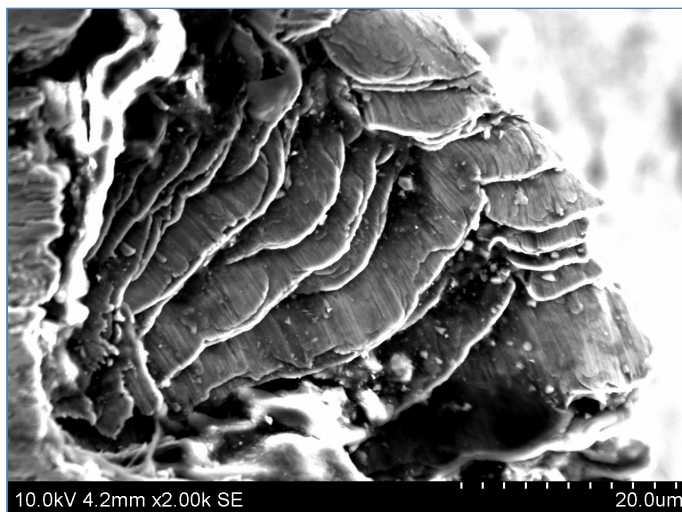


Рис. 2. Слоистое строение нароста на передней поверхности резца из P6M5K5 при точении титанового сплава BT22

На рис. 3 показаны оторвавшиеся наросты, прилипшие к внутренней поверхности стружки с частицами инструментального материала (см. рис. 3, а) и без них (см. рис. 3, б). Так происходит изнашивание режущего инструмента в зоне пластического контакта. Оторвавшиеся наросты некоторое время находятся в зоне контакта, совершают ротационные движения и нарушают сплошность самого пластического контакта.

Нарушение пластического контакта сопровождается образованием микролокальных разрывов и пустот, создающих засасывающий эффект компонентов внешней среды и СОТС. Обновленная поверхность инструмента, образовавшаяся в результате отрыва нароста, является активным каналом поверхностной диффузии, функционирующим до формирования нового нароста.

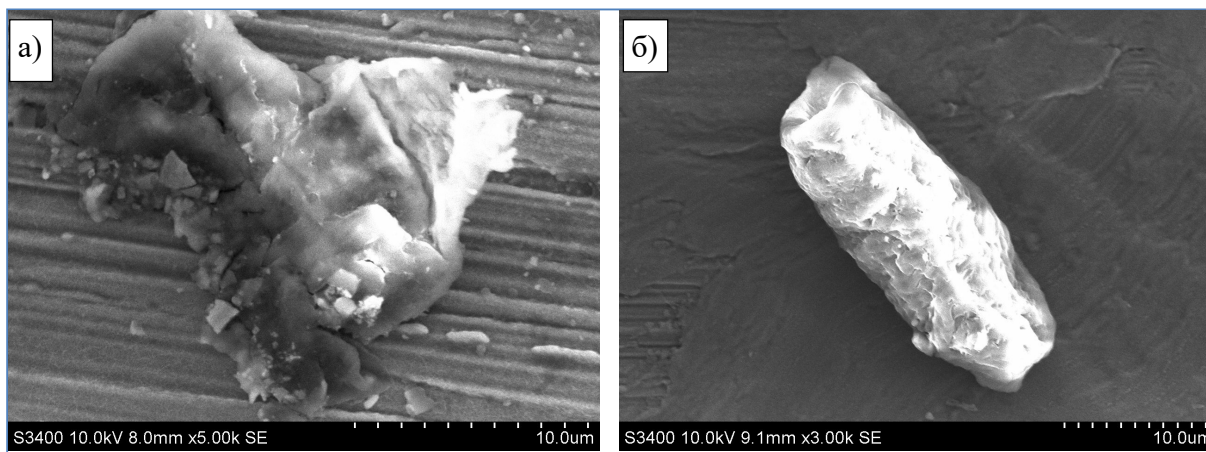


Рис. 3. Оторвавшиеся наросты на внутренней поверхности стружки:
а – нарост с частицами износа инструмента; б – без частиц износа инструмента

Повышенными каналами диффузионной проводимости являются внутренние границы раздела зерен и фаз, активность которых зависит от их геометрии и структуры. Поверхностная диффузия на 1...2 порядка выше объемной, граничная диффузия на 1...2 порядка выше объемной и остается такой же активной на поверхности. Диффузия вдоль границ зерен, образующая тройные

стыки, на 2...3 порядка выше по сравнению с чисто граничной диффузией [7]. Приведенные значения показывают, что в поверхностных слоях в зоне пластического контакта присутствует множество структур, обеспечивающих атомарный массоперенос, который в пределе на 6...8 порядков превышает активность объемной диффузии.

Пластическая деформация контактных слоев инструмента при резании металлов охватывает микро- и мезомасштабный уровни. На микроуровне происходит генерация дислокаций, а на мезоуровне – фрагментация и развитие ротационно-трансляционных вихрей. Синергетический алгоритм пластической деформации проявляется в нарушении любой микромасштабной упорядоченности и воспроизводстве упорядоченности на мезомасштабном уровне [11]. Этим можно объяснить, почему в контактных слоях режущего инструмента редко фиксируются с помощью электронных микроскопов дислокационные структуры, но легко выявляются уширения интерференционных линий при рентгеноструктурном анализе, а также мезоструктурная упорядоченность [12-14].

Генерация линейных дефектов и фрагментация мезоструктур являются разными стадиями развития единого деформационного алгоритма. Образование нароста за счет активных адгезионных процессов происходит на стадии генерации дефектов кристаллического строения, при этом сформировавшийся нарост тормозит переход деформационного процесса на мезомасштабный уровень.

Прочность адгезионной связи и вероятность отрыва частицы износа при ее разрушении зависят от энергетического состояния и степени перекрытия совмещаемых зон бифуркации обрабатываемого и инструментального материалов. На рис. 4 приведена условная диаграмма распределения центров бифуркации на деформационно-энергетических шкалах инструментального материала (ИМ) и стружки (С). Деформационно-энергетическая шкала представляет собой совокупность значений энергий активации образования различных дефектов кристаллического строения и генерируемых ими типов носителей деформации. Каждый центр бифуркации представляет собой микролокальную зону, состоящую из дефектов кристаллического строения и поля упругих напряжений вокруг них. Энергия активации центра бифуркации зависит от структурной организации дефектов кристаллического строения, которые определяют тип носителя пластической деформации или строение первичного очага разрушения при реализации бифуркационного алгоритма.

Между точками бифуркации располагаются энергетические зоны определенного типа носителя пластической деформации. В общем случае до первой точки бифуркации лежит область двойников, между первой и второй – зона дислокаций, между второй и третьей – зона дисклинаций, между третьей и четвертой – зернограничное скольжение, а за четвертой точкой – зона ротационно-трансляционных вихрей.

На деформационной шкале внутренней поверхности стружки отсутствует первая точка бифуркации, где происходит смена двойников на дислокации. Это связано с тем, что обрабатываемый материал, вступающий в контактный процесс с инструментом, находится в таком напряженно-деформированном состоянии, при котором его дальнейшая деформация протекает вдали от нелинейной упругости.

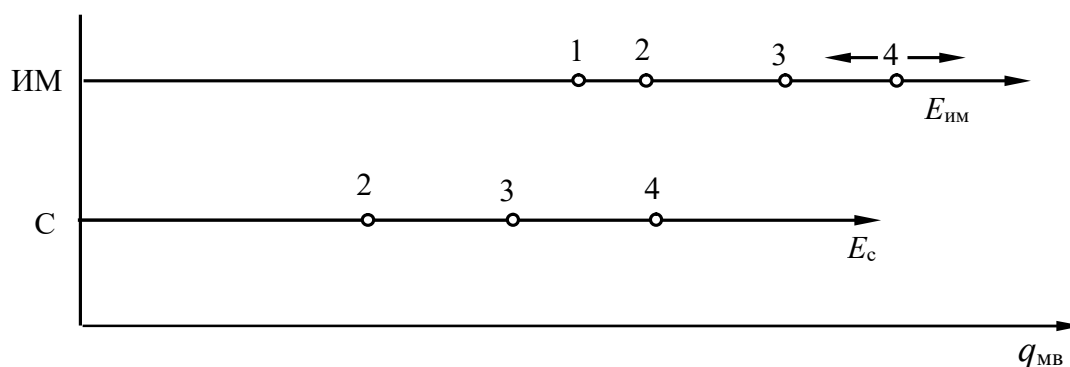


Рис. 4. Условная диаграмма энергетического распределения бифуркационных зон

На деформационной шкале инструментального материала отсутствует зона ротационно-трансляционных вихрей. Высокая термическая устойчивость (красностойкость), износостойкость и прочность инструментального материала не позволяют структуре подвергаться при локальной пластической деформации фрагментации, т.е. отсутствует способность к образованию активных фрагментированных мезоструктур. Поэтому наиболее энергоемким носителем пластической деформации в инструментальных сталях становится зернограничный сдвиг, а четвертая точка бифуркации функционирует только в режиме разрушения, при этом ее положение на деформационной шкале носит нефиксированный характер. Это означает, что любое мезомасштабное смещение в инструментальном материале может привести к образованию несплошности или очага разрушения.

В металлокерамических твердых сплавах проблематичным является зернограничное скольжение. Каждое зерно представляет собой частицы карбида или нитрида тугоплавкого металла, связанные между собой относительно тонким и пластичным металлическим слоем. В такой структуре для образования мезоструктурного кластера со своей внутренней структурной организацией недостаточно существующих сил межзеренного взаимодействия, поэтому деформационные процессы реализуются за счет автономного развития дислокаций в карбидном зерне и кооперативного смещения группы карбидных частиц, слабо зависимых друг от друга. Активные адгезионные центры в этом случае могут развиваться только в местах скопления дислокаций в карбидном зерне. Следовательно, на деформационно-энергетической шкале металлокерамического инструментального материала присутствует только одна точка бифуркации, связанная с дислокациями в карбидной фазе.

Если принять, что функционирование диссипативного процесса в зонах концентратора напряжения носит термоактивационную природу, а их энергетическая активность подчиняется распределению Гиббса, то вероятность появления адгезионного процесса можно выразить [12] уравнением

$$p_j = \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right),$$

где E_j – энергия активации образования элементарной адгезионной связи; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Величина единичного теплового импульса при этом составит

$$q_i = E_j \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right).$$

Вероятность совмещения бифуркационных зон стружки и режущего инструмента определяется

$$p_a = \exp\left(-\frac{E_{\text{ИМ}i}}{RT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_{Cj}}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{E_{\text{ИМ}i} + E_{Cj}}{RT}\right).$$

Это же соотношение характеризует вероятность образования адгезионных связей. Минимальная суммарная величина энергий активации будет определять наименьшее значение возможного теплового импульса, а максимальная – наибольшую. Общее количество тепла, выделяющегося при образовании адгезионных связей на передней рабочей поверхности режущего клина, будет равно

$$Q_{\text{пер}} = \sum_F (E_{\text{ИМ}i} + E_{Cj}) \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{ИМ}i} + E_{Cj}}{RT}\right).$$

Более прочные адгезионные связи наводятся при совмещении наиболее энергоемких точек диссипации и бифуркации, но вероятность такого сочетания является наименьшей. Следовательно, не все адгезионные связи при разрыве производят частицы износа. Наиболее вероятно образование прочных адгезионных связей и образование частиц износа в зонах распространения концен-

тратора напряжений, генерирующих зернограничное скольжение на поверхности инструментального материала.

Если исходить из того, что распределение бифуркационных зон подчиняется законам статистической термодинамики и, в частности закону Больцмана, т.е. количество бифуркационных центров будет тем больше, чем меньше их энергия, тогда среднее значение энергии адгезионного центра можно определить [15]

$$E_{cp} = \frac{E_{nm}}{\exp\left(\frac{E_{nm}}{RT}\right) - 1}.$$

Величина $\exp\left(-\frac{E_{nm}}{RT}\right) < 1$, так как определяет вероятность образования адгезионного центра, общее число которых достигает больших величин. Это означает, что $E_{nm} \gg RT$. Тогда среднее значение энергии адгезионного центра можно определить

$$E_{cp} = E_{nm} \cdot \exp\left(-\frac{E_{nm}}{RT}\right).$$

При наличии СОТС и процесса наростообразования активность адгезионных центров снижается, тогда

$$E_{Ccp} = (E_{nm} - E_C) \cdot \exp\left(-\frac{E_{nm} - E_C}{RT}\right),$$

где E_C – величина снижения энергии адгезии за счет СОТС и наростообразования.

Из полученного уравнения следует, что с применением СОТС и наростообразования вероятность появления адгезионного центра с более низкой активностью возрастает, т.е. плотность адгезионных центров, потенциально способных к отрыву инструментального материала, снижается.

Скорость массового изнашивания режущего инструмента при резании всухую в общем случае можно представить эмпирическим выражением [16]

$$\frac{dM}{dt} = i_M = \frac{Kp^a v^b}{H^c},$$

где p – нормальное давление на рабочей поверхности режущего клина; v – скорость резания; H – твердость инструментального материала; K, a, b, c – константы контактного процесса резания.

Связь между скоростью изнашивания и активностью адгезионного взаимодействия можно выразить соотношением

$$\frac{Kp^a v^b}{H^c} = \alpha E_{cp},$$

где α – коэффициент, учитывающий разрушение инструментального материала при разрыве адгезионной связи.

Тогда снижение скорости изнашивания за счет СОТС и наростообразования можно определить

$$\eta_c = \frac{i_{Mc}}{i_M} = \frac{E_{nm}}{E_{nm} - E_C} \exp\left(\frac{E_C}{RT}\right).$$

Учитывая, что поверхностные слои рабочих поверхностей режущего клина подвергаются еще и деформационному упрочнению, то общий эффект снижения скорости изнашивания при резании за счет формирования вторичных структур и снижения адгезионной активности будет равен

$$\eta_c^* = \frac{i_{Mc}}{i_{Mc}} = \left(\frac{H_y}{H} \right)^c \cdot \frac{E_{nm}}{E_{nm} - E_A - E_O - E_H} \exp\left(\frac{E_A + E_O + E_P}{RT} \right).$$

где E_A , E_O , E_H – снижение энергии адгезионного центра за счет адсорбции, образования оксидов и нароста соответственно; H_y – твердость упрочненной поверхностной структуры инструмента.

Численные величины E_A , E_O , E_H на разных участках контактной поверхности принимают свои значения, которые определяют геометрическую неоднородность износа режущего инструмента.

Заключение

Триботехнические процессы контактного взаимодействия при резании и развитие центров адгезионной активности на рабочих поверхностях режущего инструмента, представляющих мезомасштабные зоны с высокой плотностью дефектов кристаллического строения, взаимосвязаны между собой. Адгезионную активность таких центров можно понизить за счет адсорбции компонентов СОТС и продуктов их разложения, а также образования на рабочих поверхностях режущего клина островковых наростов из диспергированных фрагментов обрабатываемого и инструментального материалов. Островковые наросты представляют собой особый тип диссипативных структур с высокими антифрикционными свойствами, и их развитие реализуется по синергетическому алгоритму. Образование островковых наростов повышает стойкость режущего инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
2. Технологические методы повышения долговечности машин микрокриогенной техники / Б. Т. Грязнов, А. Н. Зинкин, В. В. Прудников, В. П. Стаценко. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 272 с.
3. Мамонова, М. В. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы / М. В. Мамонова, В. В. Прудников, И. А. Прудникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 400 с.
4. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондаль и др.; отв. ред. В. Б. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
5. Чувильдиев, Н. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и практика / Н. Н. Чувильдиев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.
6. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
7. Мерер, Х. Диффузия в твердых телах / Х. Мерер; пер. с англ. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
8. Любарский, И. М. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. – М.: Metallurgy, 1976. – 176 с.
9. Новиков, И. И. Кристаллография и дефекты кристаллического строения / И. И. Новиков, К. М. Розин. – М.: Metallurgy, 1990. – 336 с.
10. Кабалдин, Ю. Г. Атомно-дислокационный подход к процессу резания металлов / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Кузьмишин, С. В. Серый // Машиностроение и автоматизация. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 189-198.
11. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
12. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
13. Ким, В. А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии и изнашивании / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № П-1(18). – С. 79-85.
14. Ким, В. А. Морфология контактных поверхностей быстрорежущего инструмента при точении титанового сплава ВТ20 / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № П-1(26). – С. 56-63.
15. Кайзер, Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов / Дж. Кайзер; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 608 с.
16. Галахов, М. А. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / М. А. Галахов, П. П. Усов. – М.: Наука, 1990. – 240 с.



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

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РОТОРА

DESCRIPTION OF THE HIGH-SPEED ROTOR DYNAMICS

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

Mr. Alexei A. Vankov – a Postgraduate Student, Mechanical Engineering Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681008, Komsomolsk-on-Amur, ul. Lazo, 80. E-mail: vankov@gmail.com.

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

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

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

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

Аннотация. Представленная статья посвящена актуальной задаче по совершенствованию высокоточного оборудования, и в частности высокоскоростного ротора на бесконтактных газостатических опорах. Использование данного оборудования позволяет достичь высокой точности вращения 0,2...0,5 мкм. В данной статье описаны требования, предъявляемые в современной промышленности, и один из способов их достижения путем изучения динамики высокоскоростных роторных систем, влияние динамики на точность обработки, а также составлено уравнение динамики высокоскоростного ротора (ВСР). Данные теоретические исследования, в частности зависимость динамики ВСР от приложенной нагрузки, подтверждены экспериментальным способом.

Summary. The presented article is devoted to the actual task of improving high-precision equipment, in particular high-speed rotor with noncontact gas-static supports. The use of this equipment makes it possible to achieve a high accuracy of rotation of 0.2...0.5 μm . This article describes the requirements of modern industry and one of the ways to achieve them by studying the dynamics of high-speed rotor systems. The article also describes the influence of dynamics on the accuracy of processing, and the equation of dynamics of a high-speed rotor. These theoretical studies and, in particular, the dependence of the HRV dynamics on the applied load are confirmed by experimental methods.

Ключевые слова: динамика, ротор, конструктивные параметры, режимные параметры, точность вращения, сила резания.

Key words: dynamics, rotor, design parameters, mode parameters, rotation accuracy, cutting force.

УДК 621.822.574

Введение

Уровень современной промышленности обуславливает повышенные требования к различным высокоскоростным роторным системам (ВРС). Для обеспечения качественного производства требуются шпиндельные узлы (ШУ) станков, турбин газоперекачивающих станций, пневмошлифовального инструмента и другого оборудования с высокими выходными параметрами.

В настоящее время до 80 % точности работы ВСРС зависит от подшипников, используемых в конструкции: именно они вносят существенный вклад в выходные характеристики всех роторных систем в целом. Требования, предъявляемые к точности и производительности современной ВСРС: погрешность вращения не менее 0,5 мкм; обороты более 5·10 мм·мин⁻¹; диаметр обрабатываемой поверхности 10...60 мм. Создание перспективных подшипников для ВСРС, в целом обеспечивающих высокие выходные параметры, имеет первостепенное значение.

Для достижения поставленной цели была сформирована задача составления научно обоснованной методики исследования точности вращения ВСРС на основе создания математических моделей алгоритмов и программ для расчета траектории движения его оси.

Описание динамики ротора в зависимости от приложенной нагрузки

Ниже представлен рис. 1, описывающий зависимость динамики ротора (точность вращения) от приложенной силы резания.

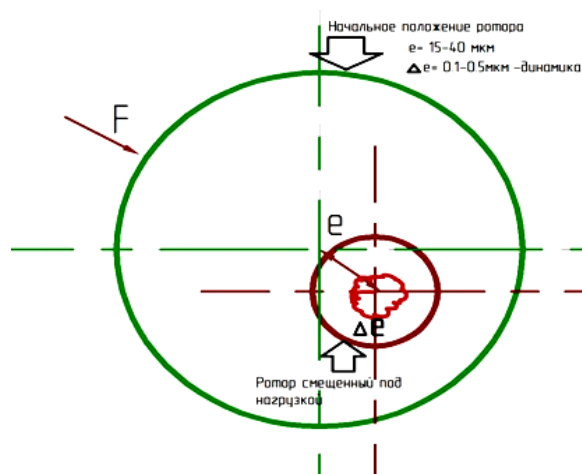


Рис. 1. Зависимость динамики ротора от приложенной нагрузки

Задается начальное положение ротора, к нему прикладывается условная сила резания F , в результате происходит смещение ротора относительно центра на условную величину e (эксцентриситет), равную 15...40 мкм, данная величина смещения зависит только от режимных параметров ротора, таких как жесткость и несущая способность, которые изменяются в зависимости от приложенной силы резания. Далее происходит биение ротора в смещенной точке на величину Δe , которая варьируется в самых минимально возможных фиксируемых диапазонах 0,1...0,5 мкм. Смещение Δe главным образом влияет на точность вращения ротора. Величина Δe зависит от конструктивных параметров ВСР (длина ротора, длина опор, величина раздвижки опор).

Экспериментальное подтверждение

Данные теоретического предположения подтверждается экспериментом, результаты которого видны на графике (см. рис. 2).

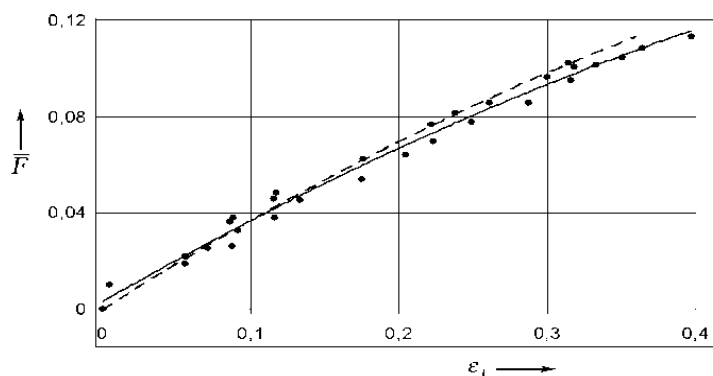


Рис. 2. Зависимость нагрузки \bar{F} от эксцентриситета ε_1

На рис. 2 видна тенденция увеличения смещения оси ротора (эксцентриситет e) при увеличенной силе резания F , в результате несущая способность ротора с увеличением эксцентриситета будет уменьшаться. В итоге можно делать выводы и находить зависимости влияния режимных параметров на точность обработки поверхности.

Динамическая модель высокоскоростного ротора

Для определения влияния конструктивных параметров ротора на точность обработки необходимо описать динамику ротора с помощью математической модели с учтенными режимными параметрами (см. рис. 3).

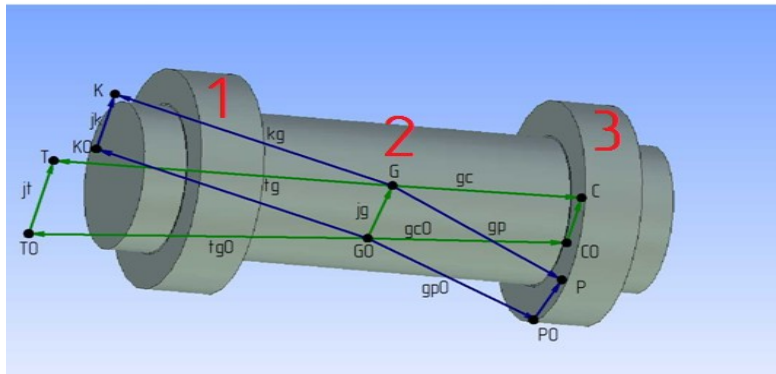


Рис. 3. Динамическая модель ротора

Ротор разбит на три условные части: передний подшипник 1, центр масс 2, задний подшипник 3. На рис. 3 представлена схема распределения масс для каждой из трех частей. В начальном положении центр тяжести ротора лежит в точке G_0 , точки T_0 и C_0 считаются неподвижными относительно центра тяжести. Вектора tg_0 и gp_0 описывают положение неподвижных точек для переднего и заднего подшипников. Задав динамическую неуравновешенность переднего и заднего подшипника K_0 и P_0 , описываем инерцию ротора, которая определяется векторами kg и gp . Перемещение точек T, P, C, K определяет смещенный центр тяжести ротора jg .

Воспользуемся подвижной системой координат, привязанной к центру тяжести ротора и описывающей его вращательное и поступательное движение (см. рис. 4).

$GX_{G1}Y_{G1}Z_{G1}$ описывает поступательное движение ротора на величину Y_G .

$GX_{G2}Y_{G2}Z_{G2}$ описывает вращательное движение ротора.

$G_0X_{G0}Y_{G0}Z_{G0}$ описывает начальное положение ротора.

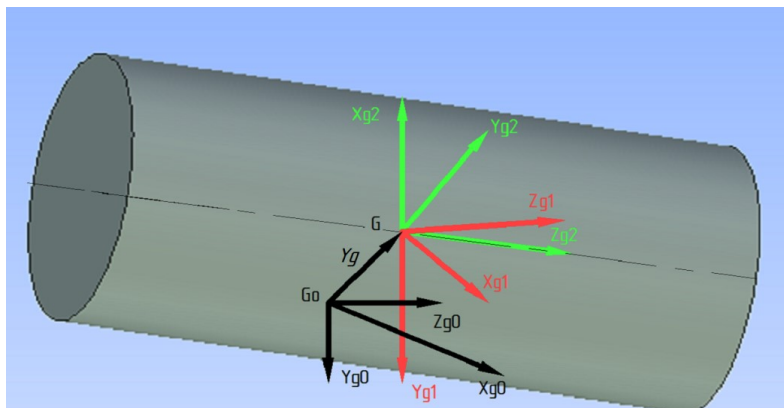


Рис. 4. Описание движения центральной части ротора

Заключение

Данная работа ориентирована на расчет динамики ВСРС на бесконтактных опорах. В первую очередь это необходимо для предсказания динамики ШУ станков, турбин газоперекачивающих станций, пневмошлифовального инструмента и другого оборудования еще на стадии проектирования в зависимости от технологических требований и желаемого режима работы с дальнейшим созданием более совершенных и оптимальных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах: моногр. / А. В. Космынин, В. И. Шаломов, В. С. Щетинин, В. Д. Жесткая, А. С. Хвостиков, А. В. Смирнов. – М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2011. – 178 с.
2. Космынин, А. В. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – Ч. 1 – 2.
3. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, Ю. Г. Кабалдин, В. С. Виноградов, С. П. Чернобай. – М: Издательский дом «Академия естествознания», 2006. – 219 с.
4. Космынин, А. В. Основы проектирования высокоскоростных шпиндельных узлов на газомангнитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 181 с.
5. Газомангнитные опоры высокоскоростных роторных систем: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова, А. С. Хвостиков. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 132 с.
6. Щетинин, В. С. Совершенствование высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах за счёт применения газомангнитных подшипников / В. С. Щетинин, А. В. Космынин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 65-68.



Иванов С. Н., Приходченко О. В., Просолович А. А., Плетников Д. В.
S. N. Ivanov, O. V. Prichodchenko, A. A. Prosolovich, D. V. Pletnikov

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ДЛЯ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**THE SIMULATION OF THE FEED MECHANISM OF COMBINED ELECTRICAL DRIVE TO
CNC MACHINES**

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Dr. habil. in Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Приходченко Оксана Вадимовна – кандидат технических наук, руководитель группы разработок управления информатизации Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859358. E-mail: okpr68@mail.ru.

Ms. Oksana V. Prichodchenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Group of Informatization Development, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859358. E-mail: okpr68@mail.ru.

Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859359. E-mail: office@knastu.ru.

Mr. Alexey A. Prosolovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Computer-aided Design Systems, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859359. E-mail: office@knastu.ru.

Плетников Денис Владимирович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)241175. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Denis V. Pletnikov – Student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(4217)241175. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. Повышение эффективности электрических приводов для машиностроительных предприятий связано с разработкой и исследованием надежности механизмов подачи станочного оборудования. Совершенствование этих элементов может быть реализовано за счет процессных или системных изменений, вариации программно-аппаратных средств управления и создания совмещенных преобразователей энергии, в которые интегрированы приводные, передаточные, исполнительные, а в ряде случаев и другие механизмы. При этом за счет технических решений, направленных на объединение исполнительного устройства и привода, обеспечивается решение задачи повышения не только надежности, но и коэффициента полезного действия. В данной статье приведены результаты проектирования, оценки надежности исполнительного элемента и реализации совмещенного электропривода, предназначенного для использования в качестве автоматизированного механизма возвратно-поступательного перемещения различных типов металлорежущих станков. Использование управляемого электромеханического преобразователя в составе совмещенного электропривода обеспечивает высокие регулировочные характеристики и качество процессов металлообработки.

Summary. The increase in the efficiency of electric drives for machine-building enterprises is associated with the development and investigation of the reliability of machine tool feeding mechanisms. The improvement of these elements can be realized through either process or systemic changes, variations in software and hardware controls, and the creation of combined energy converters into which drive, transmission, executive, and in some cases, other mechanisms are integrated. At the same time, due to technical solutions aimed at combining the actuator and the drive, a solution is provided to increase not only the reliability but also the efficiency factor. This article presents the results of designing, evaluating the reliability of the actuating element and implementing a combined electric

drive, intended for use as an automated mechanism for reciprocating the movement of various types of machine tools. The use of a controlled electromechanical converter as part of a combined electric drive provides high control characteristics and quality of metal-processing processes.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, надежность, совмещенный электропривод, механизм подачи.

Key words: electromechanical converter, reliability, combined electric drive, feed mechanism.

УДК 621.3.019

Введение

Станочное оборудование является одним из основных энергопотребителей любого современного машиностроительного предприятия. Очевидно, что на стоимость конечного изделия оказывают влияние энергоресурсы, связанные с его изготовлением. Снижение материальных затрат может быть достигнуто повышением коэффициента полезного действия энергетических устройств, используемых в станочном оборудовании. В разное время это привело к ряду технических решений, направленных на постепенное объединение исполнительного устройства и привода, что полностью соответствовало тенденции прямого развития принципа построения рациональной машины. В 1930 г. на международной энергетической конференции было показано, что возможность повышения экономичности и эффективности обобщенной теоретической машины существенным образом зависит от размещения места преобразования электрической энергии в механическую относительно последнего вала машины.

Очевидные преимущества таких устройств связаны со следующими факторами:

- отсутствие промежуточных механических редукторов, трансмиссий, вариаторов, мультипликаторов, цепных и ременных передач, и, что также важно, уплотнений;
- оптимизация конструкции без снижения качества основных характеристик за счет совмещения и/или снижения количества их элементов;
- улучшение регулировочных и динамических характеристик;
- повышение эффективности оборудования (экономичности, надежности и т.д.) на всех этапах жизненного цикла (конструирования, производства, транспортирования, хранения и технического обслуживания, эксплуатации, утилизации);
- улучшение весогабаритных показателей.

Создание совмещенных приводных устройств обеспечивает возможность энерго- и ресурсосбережения, экономичное и точное поддержание требуемых эксплуатационных показателей и отвечает современным требованиям технологичности, электробезопасности и надежности, а также экологичности.

Примерами такого оборудования является совмещенный электропривод (СЭ) на основе электромеханических преобразователей [1 – 3].

Основной проблемой при проектировании СЭ является сложность исследования и моделирования нелинейных процессов преобразования энергии в рассматриваемых устройствах, требующих одновременного учета динамики электромагнитных, гидравлических, тепловых и механических процессов. Поэтому для определения диапазона выполнимости СЭ необходимы учет теоретических и практических разработок в области механики, теплотехники, электромеханики и использование современного математического аппарата, численных методов, методов планирования эксперимента и проектирования с привлечением интегрированных САПР (CAD/CAE-систем). Причем последние в настоящее время являются универсальным инструментом разработки современных технических систем, вследствие чего широко используются для решения задач вариативного проектирования, моделирования сложных физических процессов и многофакторной оптимизации [4 – 6].



Критериями работоспособности исполнительного механизма системы контроля и управления доступом (СКУД), состоящего из тороидального вращающегося ротора с внутренней резьбой и перемещающейся в горизонтальном направлении тяги, являются:

- прочность элементов резьбовой части ротора и тяги;
- устойчивость тяги при продольных изгибающих усилиях в случаях его нагружения изгибающими и растягивающими силами;
- скорость износа резьбового сопряжения в реальных условиях эксплуатации.

Целями как проектного, так и проверочного расчетов являются определение и обеспечение параметров механизма, соответствующих заданным критериям при заданных размерах механизма подачи. Исходными данными для проектного расчета являются: величина наибольшего осевого перемещения L тяги относительно ротора, наибольшая осевая нагрузка Q с учетом направления ее приложения. В случае электромеханического привода должна быть заданной линейная скорость перемещения тяги относительно ротора v в осевом направлении при частоте вращения последнего ω . Эксплуатационные требования к приводу, например, такие как необходимость выполнения условия электромагнитного торможения, задаются дополнительно.

Теоретические основы исследования. Анализ механических передач в условиях скольжения показывает, что для тяги, на которую действует растягивающая нагрузка, также как и для нагрузок сжатия, превышающих 20...25 кН, для приведенных длин не выше 0,5 м основным критерием работоспособности является скорость износа резьбового сопряжения.

Поскольку на скорость изнашивания элементов подачи существенно влияет давление q , его расчетное значение не должно быть выше допустимой величины, т.е.

$$q = \frac{Q_n}{A_n} \leq [q],$$

где Q_n – изгибное (нормальное) усилие в сопряжении; A_n – теоретическая площадь соприкосновения элементов резьбового сопряжения.

Без учета угла подъема резьбы, но с учетом того, что нагрузка по виткам распределена равномерно, величина давления составит

$$\frac{Q_n}{A_n} = \frac{Q}{z \cdot A},$$

где Q – сила (осевая) тяги, Н; z – число общих витков резьбы сопряжения; A – площадь, определяемая проекцией рабочей поверхности одного витка на перпендикулярную оси тяги плоскость.

При этом допущении условие износостойкости резьбы имеет вид

$$q = \frac{Q}{z \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H_1} \leq [q],$$

где d_2 – усредненный диаметр резьбы; H_1 – рабочая высота выбранного профиля; $[q]$ – нормативное давление в сопряжении, МПа.

Последняя формула, содержащая три неизвестных параметра, не имеет однозначного решения. При инженерных расчетах задаются два дополнительных соотношения:

- в зависимости от профиля резьбы определяется относительная глубина $\psi_h = H_1 / p$ (для упорных – $\psi_h = 0,75$, для трапецидальных резьб $\psi_h = 0,5$);

- относительная высота ротора $\psi_H = H_p / d_2$, где H_p – полная высота ротора.

Величина ψ_H предварительно принимается в пределах ряда 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 и окончательно выбирается по результатам итерационного расчета. Большие значения целесообразно принимать для силовых приводов.

Полная высота резьбовой части ротора

$$H_p = z \cdot P,$$

где P – шаг резьбы.

С учетом H_p средний диаметр резьбы

$$d_2 \geq \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot \Psi_h \cdot \Psi_H \cdot [q]}}$$

Последовательность расчета исполнительного механизма:

1. выбор материалов тяги и резьбовой части ротора;
2. определение нормированного давления $[q]$ на несущей поверхности резьбы и допускаемых напряжений;
3. определение относительной глубины резьбы Ψ_h и относительной высоты резьбовой части ротора Ψ_H ;
4. определение среднего диаметра резьбы.

Все размеры выбираются по таблицам стандартных резьбовых соединений исходя из ближайших больших значений d_2 . Число рабочих витков резьбовой части ротора

$$z = \frac{d_2 \cdot \Psi_H}{P}$$

Варианты с числом z меньшим 10 технически неприемлемы, соответственно, это приводит к уменьшению числа итераций в дальнейшем расчете.

При осевой (сжимающей тягу) силе Q возникает необходимость проверки продольной устойчивости на изгиб. Предварительно определяется гибкость тяги исходя из внутреннего диаметра резьбы d_3 и без учета влияния витков резьбы по выражению

$$\lambda = \frac{4 \cdot \mu \cdot L}{d_3},$$

где μ – коэффициент, зависящий от способа закрепления подвижных опор, используемый для нахождения приведенной длины. При шарнирных опорах тяг $\mu = 1$.

Значение гибкости λ_1 , соответствующее границе устойчивости (критическое напряжение), принимается равным пределу пропорциональности.

Если $\lambda > \lambda_1$, то расчет на устойчивость для критической силы ведется по формуле Эйлера:

$$Q_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot L)^2},$$

где E – справочное значение модуля упругости материала тяги; $I = \pi \cdot d_3^4 / 64$ – момент инерции сечения в поперечном направлении по внутреннему диаметру резьбового сопряжения.

Если соотношение не выполняется и $\lambda < \lambda_1$, в качестве расчетного выражения на устойчивость используется формула Ф. С. Ясинского:

$$Q_{кр} = \frac{\pi \cdot d_3^4}{4} \cdot (a - b \cdot \lambda),$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, имеющие размерность напряжений.

Необходимый проектный коэффициент запаса устойчивости s_y , обеспечивающий требуемый уровень работоспособности, должен быть не ниже детерминированного $[s_y]$:

$$s_y = \frac{Q_{кр}}{Q} \geq [s_y].$$

Рекомендуемый диапазон значений $[s_y] = 3 \dots 4$.



Поскольку при проектировании частота вращения (ω , с⁻¹) ротора и скоростная характеристика осевого перемещения (v , мм/с) тяги заданы, требуемое число заходов резьбы может быть рассчитано по формуле

$$n = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\omega \cdot P}$$

По среднему диаметру резьбового сопряжения определяется расчетный угол подъема резьбы:

$$\psi = \arctg \frac{P_h}{\pi \cdot d^2},$$

где используемая величина хода P_h определяется произведением шага на число заходов.

Коэффициент трения в резьбе, приведенный к расчетным условиям, определяется с учетом угла профиля по выражению

$$f' = \frac{f}{\cos \alpha / 2},$$

где f – коэффициент трения для материалов сопряжения; α – угол профиля.

Соответственно, угол трения в резьбе, приведенный к расчетным условиям,

$$\rho' = \arctg f'.$$

При наличии необходимости обеспечения самоторможения в резьбовом сопряжении рассматривается соотношение

$$\psi < \rho'.$$

Опорные реакции в резьбовом сопряжении и момент сил трения

$$M_p = Q \cdot \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho').$$

Обусловленный действующей на опоре осевой силой момент трения M_p зависит от ее конструктивного исполнения.

При наружном диаметре D_0 и внутреннем d_0 момент трения кольцевой опоры скольжения составит

$$M_{on} = \frac{1}{3} \cdot Q \cdot f \cdot \frac{D_0^3 - d_0^3}{D_0^2 - d_0^2},$$

где f – коэффициент трения на сопряженных участках поверхности.

Если на коническом участке тяги, входящем в центровое отверстие, на диаметре d_0 имеется периферийное кромочное трение, то

$$M_{on} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot f \cdot d_0.$$

Эта формула при наличии опорного подшипника определяет в нем момент сил трения, при этом коэффициент трения принимается равным $f = 0,01$.

Момент, действующий в растянутых (или сжатых) сечениях тяги, зависит от конструктивной схемы механизма подачи. Разделение резьбовой частью ротора точки приложения динамического момента и точки приложения осевой силы приводит к кручению тяги в растянутых (или сжатых) сечениях только моментом на опоре. В противоположном случае, если точки приложения вращающегося момента и осевой силы расположены с одной стороны относительно ротора или ротор вращается при неподвижной тяге, растянутые (или сжатые) сечения тяги нагружены соответственно моментом в резьбовом сопряжении.

При одновременном действии напряжений растяжения (или сжатия) устойчивость тяги на кручение проверяется в соответствии с условием исходя из значений эквивалентных напряжений σ_3 ,

$$\sigma_3 = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_3^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M}{0,2 \cdot d_3^3}\right)^2} \leq [\sigma]_{p(сж)},$$

где M – крутящий (тангенциальный) момент, вызывающий напряжение в расчетном сечении; $[\sigma]_{p(сж)}$ – нормируемое для материала тяги напряжение при растяжении или сжатии.

Резьбовая часть ротора проверяется на прочность по условию отсутствия среза:

$$\tau_{ср} = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot z \cdot b} \leq [\tau]_{кр},$$

где b – толщина витка у основания резьбы (для упорных резьб $b = 0,736P$; для трапецеидальных профилей $b = 0,634P$); $[\tau]_{кр}$ – допускаемое напряжение.

Нарушение требуемого условия приводит к необходимости выбора резьбы следующего диаметра при том же или ближайшем большем шаге.

По условиям прочности при растяжении с одновременным учетом напряжений кручения наружный диаметр резьбового сопряжения ротора рассчитывается по выражению

$$d_r = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot [\sigma]_p} + D_4^2}.$$

Допускаемые для материала напряжения резьбовой части ротора назначаются по машиностроительным рекомендациям, приведенным в [7]. В случае расчета механизма подачи с упорной резьбой вместо D_4 подставляется D в соответствии с принятыми обозначения стандарта.

Конструктивно целесообразно принимать $d_r \geq D_4 + 8$ мм, для исключения деформации резьбовой части в роторе.

Исходя из условия прочности несущей поверхности бурта при смятии его наружный диаметр D_r рассчитывается по формуле

$$D_r \geq \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot [\sigma]_{см}} + (d_r + 2 \cdot c)^2},$$

где c – размер фаски в отверстии корпуса, в котором находится резьбовая часть.

Последующая проверка на прочность при изгибе принятой конструктивно высоты бурта $h_r \approx 0,25 H_r$ производится по формуле

$$\sigma_n = \frac{3 \cdot Q \cdot (D_r - d_r)}{\pi \cdot d_r \cdot h_r^2} \leq [\sigma]_n.$$

Мощность исполнительного механизма определяется по выражению

$$P_b = (M_p + M_{on}) \cdot \omega_b.$$

Определяющим критерием работоспособности может быть принята устойчивость тяги при продольном изгибающем напряжении, если при этом приведенная длина тяги выше 0,7 м или осевые сжимающие усилия не превышают 15...20 кН.

Последовательность расчета механизма перемещения:

1. Усталостный расчет при сжатии или растяжении исходя из расчетной осевой силы Q_p , превышающей фактически действующую силу (не менее чем в 1,3 раза) и учитывающей напряжения кручения, одновременно действующие с растягивающими или сжимающими напряжениями:

$$Q_p = 1,3 \cdot Q.$$

2. Внутренний диаметр резьбовой части тяги по условиям прочности при сжатии или растяжении определяется по формуле

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot [\sigma]_{p(\sigma c)}}}.$$

3. Определяется гибкость тяги:

$$\lambda = \frac{4 \cdot \mu \cdot L}{d_3}.$$

4. Внутренний диаметр резьбы тяги при $\lambda > \lambda_1$

$$d_3 = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot (u \cdot L)^2 \cdot Q \cdot [n_y]}{\pi^3 \cdot E}}.$$

5. Внутренний диаметр резьбы тяги при $\lambda < \lambda_1$

$$d_3 \geq 2 \cdot \mu \cdot L \cdot \frac{b}{a} + \sqrt{\left(2 \cdot \mu \cdot L \cdot \frac{b}{a}\right)^2 + \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot a} \cdot [n_y]}.$$

При сжимающей силе Q из значений d_3 для дальнейших расчетов принимается большая величина, округленная до ближайшего стандартного значения.

Для случая равномерного распределения q на нагруженных поверхностях у всех z витков резьбой части ротора условие долговечности резьбы

$$q = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot [(d_3 + 2 \cdot H_1)^2 - d_3^2] \cdot z} \leq [q]$$

Решение этого уравнения относительно H_1 позволяет рассчитать необходимую рабочую глубину резьбы:

$$H_1 = \sqrt{\left(\frac{d_3}{2}\right)^2 + \frac{Q}{\pi \cdot z \cdot [q]} - \frac{d_3}{2}}.$$

При нахождении параметров механизма подачи число витков резьбовой части ротора принимается $z \leq 10$, шаг зависит от профиля резьбы (для трапецеидальной резьбы $P = 2 H_1$, упорной – $P = 3/4 H_1$).

Моделирование механизма подачи

Основные размерные соотношения, полученные в результате расчета исполнительного механизма, позволяют перейти к имитационному моделированию механизма сопряжения.

Задачей проектирования механизма подачи является создание его геометрической сборочной модели, интегрируемой в совмещенный с ним электромеханический преобразователь. Это позволяет эффективно решить задачи обеспечения вариативного проектирования, проработки компоновки, проверки соответствия сопрягаемых элементов, создания расчетных моделей, позволяющих провести вычислительный эксперимент с использованием методов инженерного анализа. Кроме того, реализация параметрической модели позволяет произвести расчет динамических характеристик механизма подачи, создать анимацию физических процессов при варьировании проектных параметров, визуализировать конструкторско-технологические процессы, подготовить полный комплект конструкторской документации: сборочные чертежи, спецификации, чертежи деталей.

В случае отсутствия достоверной информации о фактическом вкладе отдельных параметров и/или большом их количестве возникает необходимость использования методов планирования эксперимента для количественной оценки влияния отдельных проектных параметров механизма

подачи на выходные характеристики ГЭМП. Нахождение субоптимального или эффективного варианта требует исследования различных конструктивных вариантов механизма подачи, т.е. создания модифицируемой геометрической модели.

Использование современных технологий параметризации обеспечивает быструю вариацию проектируемого механизма подачи и позволяет максимально оперативно решить рассматриваемую задачу.

Разработка параметрической модели механизма подачи выполнена с использованием отечественной (разработчик компания «Топ Системы» г. Москва) автоматизированной системы проектирования T-Flex CAD, отличающейся мощными параметрическими возможностями.

Это связано с тем, что T-FLEX CAD является эффективной системой, позволяющей получать параметрические (включая сборочные) чертежи любой сложности и использовать до 105 параметрически связанных между собой элементов. Следует отметить, что отличительной чертой T-FLEX CAD является то, что она не использует построенную на размерной параметризации подсистему фирмы D-CUBED, характерную для таких систем, как Inventor, SolidWorks, Autodesk Mechanical Desktop, Solid Edge [8].

Эта подсистема имеет определенные количественные ограничения, заданные пользователем, в виде системы нелинейных уравнений, которые решаются различными вариационными методами, и в целом предназначена для трехмерных операций при построении эскизов. При этом могут возникнуть трудности с проблемой выбора «нужных» корней, если система имеет не единственное решение, что может привести к неоднозначным решениям при параметрическом пересчете. Также проблемой вариационных решателей является работа с моделью значительной размерности.

В T-FLEX CAD используется геометрическая параметризация, позволяющая рассматривать не только положение линий и элементов сборочного чертежа, но и содержимое текста и любые атрибуты элементов. Параметризация в T-Flex CAD происходит на всех уровнях от значений атрибутов операций (в частности, величина выталкивания) до эскиза или профиля для трехмерной операции. Такой подход позволяет модифицировать трехмерную модель за счет изменения формы эскиза или величины параметров операций. При этом проектные параметры могут быть заданы любыми связями между собой. Такого уровня параметризации нет ни в одной системе.

Основными достоинствами T-FLEX CAD при трехмерном параметрическом моделировании являются:

- использование геометрической параметризации (гибкое редактирование модели при вариации определяющего элемента модели, все определяемые элементы изменяются в соответствии со способом задания их параметров);
- использование мощных механизмов параметризации для подготовки эскизов;
- параметрическое изменение назначаемых описаний трехмерных операций;
- высокая надёжность и скорость пересчёта модифицируемой модели;
- широкие возможности при построении ассоциативных сборок и моделей;
- возможность создания специализированных параметрических библиотек;
- возможность обращения к базам данных, прикладным модулям в процессе пересчёта модели;
- быстрое выявление ошибок и причин их возникновения при пересчёте;
- естественность и удобство задания ограничений;
- использование переменных, заданных с помощью выражений, содержащих встроенные переменные, и арифметических и логических операций;
- реализация двунаправленной ассоциативности 2D/3D;
- использование команды «пересчёт размеров в середину поля допуска», которая необходима, например, при подготовке модели для создания программы для станка с ЧПУ.

Таким образом, параметризация в T-FLEX CAD организует топологию «управляемой» модели: изменение параметров или размеров приводит к регенерации всех связанных деталей и сборок.



При создании сборочной параметрической модели механизма подачи в T-FLEX CAD могут быть использованы два различных метода сборки: сборка «снизу-вверх» или «сверху-вниз». Метод сборки «снизу-вверх» аналогичен реальной сборке: имеющиеся детали последовательно передаются в файл сборки. При методе сборки «сверху-вниз» сначала определяется общая компоновка сборочной единицы, далее происходит автоматическое выделение и детальная проработка отдельных элементов как в отдельных файлах, так и не выходя из общей сборки (работа с деталями в контексте сборки).

Первый метод сборки осуществляется путем привязки деталей друг к другу с одновременным формированием схемы хронологии связей деталей.

Проектирование в системе T-FLEX CAD по такой технологии имеет следующие преимущества:

- проектирование деталей в отдельном файле дает возможность не только выделить компоненты, но и упростить процесс проектирования сложного изделия;
- возможность использования базового 3D-фрагмента в несвязанных сборочных документах, формирования библиотек стандартных и унифицированных параметрических 3D-фрагментов;
- возможность назначаемой привязки к другим 3D-фрагментам и элементам сборочной 3D-модели.

Сборка деталей, спроектированных в отдельном файле, эффективна для так называемых «сборок с короткой хронологией», сложныхборок или типовых механизмов, содержащих значительную долю унифицированных деталей. Кроме того, метод «снизу-вверх» легко реализуем для создания изделий, которые содержат базовую деталь (корпус, основание и т.п.), служащую для размещения и крепления других деталей. Для механизма подачи такой деталью является ротор преобразователя. В этом случае хронология сборки упрощается, а схема связей между деталями сборки выглядит в виде дерева, стволом которого является базовая деталь.

При проектировании сборочной трехмерной модели механизма подачи используется метод сборки «снизу-вверх», т.е. сборочная модель составляется из ранее спроектированных трехмерных деталей (3D-фрагментов) с известными геометрическими параметрами.

Создание 3D-моделей элементов сборки

На первоначальном этапе создания параметрической сборочной 3D-модели механизма подачи необходимо спроектировать параметрические 3D-модели элементов сборки (3D-фрагменты) – отдельных деталей, входящих в исполнительный механизм.

Процесс параметрического моделирования в T-FLEX CAD можно осуществить двумя способами: одновременным или последовательным созданием геометрической формы проектируемого объекта и задания его параметров и их значений. В процессе создания модели механизма подачи использован второй способ, при котором весь процесс моделирования разбивается на два этапа:

1. создание геометрии проектируемого объекта (построение профилей, выполнение операций 3D-моделирования, позиционирование деталей в сборочной модели);
2. задание параметров проектируемого объекта (линейные, угловые размеры, количество элементов) и их значений (чисел, переменных, выражений).

В процессе моделирования использованы следующие операции геометрического моделирования из подменю «Операции» главного меню системы T-FLEX CAD: вращение, выталкивание, сглаживание, круговой массив, линейный массив, булевы операции.

Моделирование базовой детали. Задача создания параметрической модели корпуса ротора не является необходимой, т.к. эта деталь стандартизована и выпускается определенного типоразмера. Однако поскольку его размерные соотношения (длина l , диаметр d) определяют границы области проектирования для механизма подачи, то в работе реализована возможность параметризации этого элемента сборки.

Базовая деталь механизма подачи – корпус ротора – с геометрической точки зрения является телом вращения. Геометрическая 3D-модель «Корпус», приведенная на рис. 1, создана с использованием операции «вращение» путем вращения ранее созданного профиля заданной формы (с внутренней выточкой) вокруг оси x .

Создание параметрической сборочной 3D-модели и ее параметризация. Сборочная модель выполняется методом «снизу-вверх». Базовой деталью сборки является ротор, в который позиционируется сборочная единица (исполнительный элемент) и последовательно все остальные элементы сборки (3D-фрагменты). Привязка 3D-фрагмента производится за счет определения двух систем координат – целевой и исходной. Первая подготовленная заранее система координат принадлежит 3D-фрагменту, вторая располагается на сборочной модели. В пространстве после совмещения целевой и исходной систем координат 3D-фрагмент однозначно позиционируется. Компьютерная сборочная модель механизма подачи приведена на рис. 2.

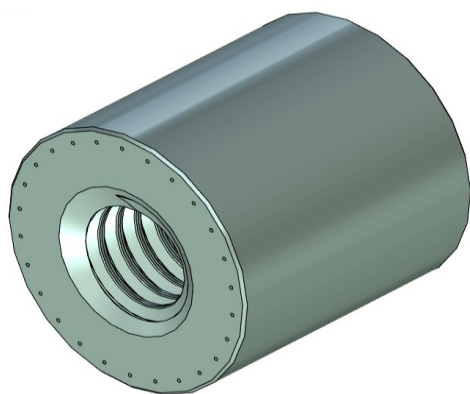


Рис. 1. Геометрическая 3D-модель «Корпус»

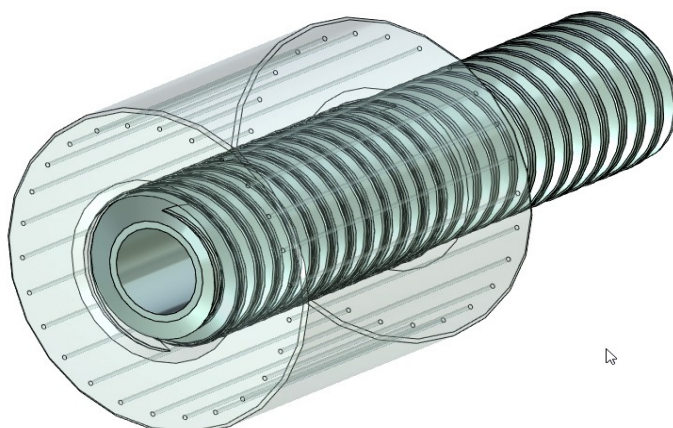


Рис. 2. Сборочная модель механизма подачи

Полученная сборочная модель позволяет реализовать в T-FLEX CAD возможность управления следующими параметрами механизма подачи:

- геометрической формой элементов сборки при передаче значений параметров с помощью внешних переменных фрагмента;
- количеством элементов сборки;
- положением элементов сборки.

Переменные, их значения и взаимосвязи между ними, используемые при параметризации отдельных элементов сборочной единицы, показаны на рис. 3.

На рис. 3 в качестве переменных использованы машиностроительные обозначения: d , D_4 – наружный диаметр резьбы; $d_2 = D_2$ – средний диаметр резьбы; d_3 , D_1 – внутренний диаметр резьбы.

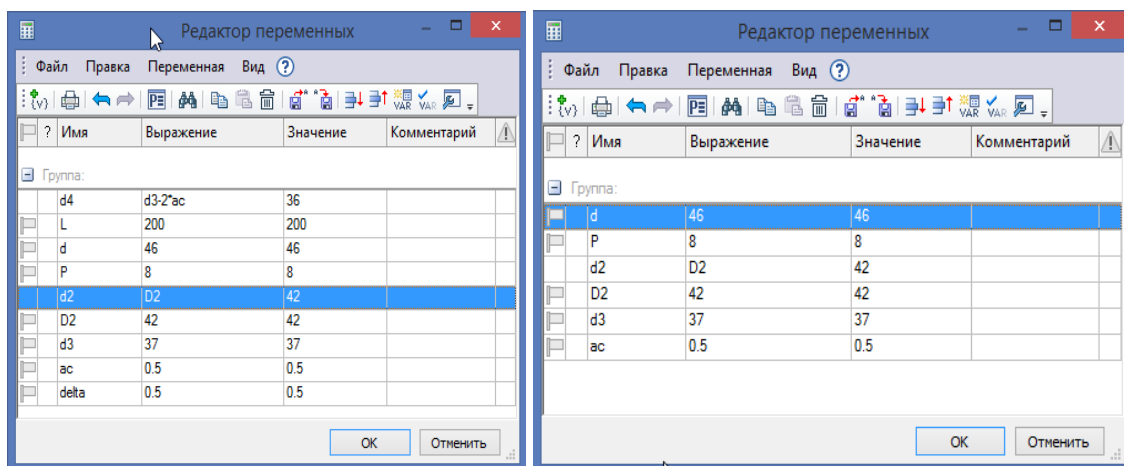


Рис. 3. Редактор переменных для параметрической модели механизма подачи



Для переноса расчетной геометрической модели в систему инженерного анализа используется нейтральный формат для обмена геометрическими данными «iges». Данный формат файла является открытым форматом и предназначен для обмена графической информацией между CAD/CAE-системами. Система T-FLEX CAD обеспечивает возможность экспорта геометрических данных в данный формат.

Заключение

В статье предложены алгоритм моделирования механизма подачи совмещенного электропривода с использованием компьютерных 3D-технологий и методика расчета его основных эксплуатационных параметров с учетом критериев работоспособности. Приведен пример реализации опытного образца механизма подачи в программе T-FLEX CAD. Полученные результаты являются основой для создания промышленного оборудования, использующего прецизионные механизмы подачи и позиционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 2314624 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 5/24, F 16 С 17/03. Низковибрационный электро-механический преобразователь для привода станков / С. Н. Иванов, Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев, П. А. Саблин; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2006119279/09; заявл. 23.05.2007; опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1. – 2 с.
2. Пат. № 2472242 С1 Российская Федерация, МПК H01F 1/147. Электромеханический преобразователь / С. Н. Иванов, О. Г. Шакирова, М. А. Шпилев; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2011142932/07; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1. – 2 с.
3. Пат. № 137163 U1 Российская Федерация, МПК7 H02K 1/16, 1/17, 1/22, 21/16. Электромеханический преобразователь / К. К. Ким, А. А. Ткачук, С. Н. Иванов; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2013134831/07; заявл. 23.07.2013; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3. – 2 с.
4. Большаков, В. П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: учеб. курс / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, А. А. Сергеев. – СПб.: Питер, 2011. – 336 с.
5. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
6. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
7. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк, 2008. – 408 с.
8. Kim, K. K. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of heating electromechanical transducers / K. K. Kim, N. S. Karpova, O. V. Prichodchenko // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2(35). – С. 26-31.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Захарова Н. В., Куриный В. В.
N. V. Zakharova, V. V. Kurinii

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ

CREATING THE PROPERTIES OF FORMING MIXTURES WHEN USING VARIOUS METHODS OF PROCESSING

Захарова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры теории и методики технологического образования Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(4217)52-12-05.

Ms. Natalia V. Zakharova – PhD in Engineering, Associate Professor, Theories and Principles of Engineering Education Department, Amur State University of Humanities and Pedagogy (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(4217)244-774.

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

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

Аннотация. Рассмотрен вопрос получения качественных отливок и форм путем приготовления формовочных смесей с необходимыми характеристиками. Приведено определение активации формовочных смесей. Определено, что из физических методов наиболее простым является магнитная активация связующих. Химический метод активации заключается в применении различных добавок для улучшения свойств смесей. Рассмотрены связующие материалы. Приведена цель исследования. Исследовано влияние процессов активации на свойства жидкостекольных композиций в литье по выплавляемым моделям. Рассмотрена возможность использования местных минеральных ресурсов при изготовлении оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям. Представлены экспериментальные данные, полученные при исследовании свойств оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям на основе жидкого стекла с использованием местных сырьевых ресурсов. Приведены основные выводы. Установлено, что использование местных минеральных ресурсов при изготовлении оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям позволяет получать оболочковые формы, не уступающие по своим характеристикам полученным на этилсиликатных связующих.

Summary. The problem of obtaining quality castings and molds with molding mixtures of the necessary characteristics is considered. The definition of activation of molding mixtures is given. Magnetic activation of binders is the simplest physical method in the inventory of methods. The chemical method of activation consists in the use of various additives to improve the properties of mixtures. Binding materials are considered. The purpose of the study is given. The influence of activation processes on the properties of liquid-glass compositions in casting on investment models is investigated. The possibility of using local mineral resources in the manufacture of shell molds in casting for investment models is considered. The authors presents experimental data obtained in the study of the properties of shell molds in casting for investment models based on liquid glass using local raw materials. The main conclusions are given. It is established that the use of local mineral resources in the manufacture of shell molds in casting for investment models makes it possible to obtain shell molds that are not inferior to those obtained on ethyl silicate binders.

Ключевые слова: оболочковые формы, активация, формовочная смесь, отливка, связующее.

Key words: shell molds, activation, molding mixture, casting, binder.

УДК 621.742.48

Для получения качественных отливок и форм необходимо приготовить формовочную смесь с нужными характеристиками. Этого можно добиться путем активации шамотизированного бентонита, глины, формовочных смесей. Под активацией понимается обработка химическими



добавками исходных формовочных материалов, которая проводится с целью повышения «мокрой» прочности. При активации может быть снижено содержание бентонита в смеси. Активация позволяет устранить часто встречающиеся дефекты отливок (ужимины, пригар и засор), повышает одновременно прочность смеси на сжатие во влажном состоянии и прочность переувлажненной зоны, которая определяется прочностью смеси на растяжение. Прочность переувлажненной зоны (мокрая прочность) определяется при одностороннем прогреве смеси, является весьма чувствительной характеристикой качества и степени активации, оказывающей влияние на устранение ужимин в отливках. Одним из способов активации является безреагентный способ, т.е. магнитная обработка, ультразвуковая, акустическая, обработка электрическим полем. При тех же результатах активации (улучшение технологических и физико-химических свойств смеси) безреагентный способ более экономичен, т.к. не требует большого расхода реагентов, и более экологичен из тех же соображений.

Связующие материалы, применяемые для изготовления стержней и форм, оцениваются с точки зрения экономичности, технологии и окружающей среды. Наиболее распространенными связующими для изготовления форм и стержней являются неорганические связующие (бентонит, огнеупорная глина, жидкое стекло и металлофосфаты). Отверждение жидкостекольных смесей производится продувкой углекислым газом, эфирами, порошкообразными силикатами. С целью повышения прочностных свойств, улучшения выбиваемости, снижения прилипаемости и себестоимости смесей на основе жидкого стекла предложено применять добавки горючего органического растворителя, хлористого и сернокислого натра, соляной кислоты, едкого натра, мела и др.

С целью улучшения физико-механических и технологических свойств смесей применяется активация связующих физическими, химическими и физико-химическими методами.

Из физических методов наиболее простым является магнитная активация связующих. Химический метод активации заключается в применении различных добавок для улучшения свойств смесей.

Целью данного исследования являлось получение оболочковой формы в литье по выплавляемым моделям на основе жидкого стекла с использованием местных сырьевых ресурсов.

Исследовано влияние процессов активации на свойства жидкостекольных композиций в литье по выплавляемым моделям.

Качество изготавливаемых отливок во многом определяется составом и свойствами формовочных и стержневых смесей, поэтому их улучшению уделяется большое внимание.

Формирование свойств песчаных и стержневых смесей как дисперсных систем происходит в значительной степени под влиянием поверхностных явлений на границах фаз и сил межмолекулярного притяжения, действующих в системе минеральная частица смеси – жидкая фаза.

Смачиваемость песка, огнеупорной глины и смеси песка, огнеупорной глины и связующих зависит от поверхностного натяжения и поверхностной энергии жидкости. Подъем жидкости в капилляре обусловлен наличием разности давлений и поверхностного натяжения. С учетом того, что поры между песчинками кварца и частицами огнеупорной глины представляют собой микрокапилляры, правомерно изучена смачиваемость фосфатных связующих минеральными составляющими (песком, огнеупорной глиной и смесью кварцевого песка с добавкой огнеупорной глины). Этот показатель предопределяет формирование структуры и свойств смесей.

Исследовалась поверхностная активность (ПА) глины хурмулинского месторождения (г. Комсомольск-на-Амуре) относительно воды. При этом ПА оценивается временем, в течение которого вода поднимается по капиллярам исследуемой глины на определенную высоту.

Согласно принятой методике, один конец проградуированной стеклянной трубки обвязывали двумя слоями марли. Затем в трубку насыпали глину. Трубку ставили в поддон, наполненный водой, активированной 5%-м, 10%-м, 15%-м растворами NaOH и натриевой соли ортофосфорной кислоты. Вода была налита в поддон до определенного уровня. Одновременно

включали секундомер и отмечали время подъема влаги на фиксированную высоту: 10, 20, 30 ... h_{\max} , мм. За максимальную высоту принимали высоту, на которой влага «стоит» в течение 5 мин.

Также была подготовлена омагниченная вода, несколько раз (1 и 2) пропущенная через постоянный магнит (перед тем как залить в оснастку).

Подъем жидкости в капилляре (в стеклянной трубке, наполненной глиной) объясняется наличием давлений, обусловленных искривлением поверхности минеральных частиц в капилляре, зависящим от гидростатического столба жидкости или связующего.

В свете рассмотренных закономерностей представляет значительный интерес изучение явлений, происходящих при безреагентной (магнитной) обработке воды, глинистой суспензии и других связующих.

Теоретические и экспериментальные данные показывают, что энергия взаимодействия иона с диполями воды намного превышает энергию взаимодействия между молекулами воды. Отмеченное явление оказывает влияние на формирование свойств формовочных смесей при различных методах обработки.

Установлено, что наилучшие результаты получаются при активировании глины 10%-м раствором NaOH, 5%-м раствором ортофосфорной кислоты, при активации омагниченной воды, пропущенной через постоянный магнит 3 раза.

Для исследования влияния процессов активации на свойства жидкостекольных композиций в литье по выплавляемым моделям изготавливались стандартные образцы из трех слоев. В качестве наполнителей использовались глина и маршалит. На первом этапе исследований суспензия приготавливалась без использования активаторов. Далее глинистая составляющая активировалась 5%-м, 10%-м, 15%-м растворами NaOH и ортофосфорной кислотой. Соотношение наполнителей (глина и маршалит соответственно): 5:95; 25:75; 50:50; 75:25; 95:5 (см. табл. 1).

Таблица 1

Геометрические размеры образцов, величина прогиба, структура образцов

Соотношение наполнителей, %	Способ активации	Ширина, мм	Высота, мм	Прогиб, мм
25 % глины 75 % маршалита		20,1	2,5	0,4
		21,2	2,3	0,1
		20,5	2,8	0,15
		20,2	2,4	0,05
25 % глины 75 % маршалита	10 % NaOH	20,2	2,4	0,4
		20,1	2,3	0,4
		20,1	2,37	0,25
		20,8	2,1	0,05
5 % глины 95 % маршалита	5 % ортофосфорной кислоты	20,7	4,2	0,2
		20,8	3,3	0,2
		19,6	3,8	0,85
		19,5	3,6	0,15

Для измерения вязкости использовался вязкозиметр ВЗ-4.

Полученная суспензия наносилась на парафиновые модели и обсыпалась песком.

При нанесении первого слоя суспензия удаляет с поверхности моделей адсорбированный воздух и смачивает поверхность блока. Смачивание модели производилось только после полного завершения процесса ее усадки. При извлечении смоченного блока из суспензии он поворачивался в различных направлениях с такой скоростью, чтобы успел стечь излишек суспензии и она равномерным слоем растеклась по поверхности модели. Далее на слой суспензии немедленно наносился зернистый обсыпочный материал.

Сушка оболочек производилась при атмосферном давлении, на воздухе, при комнатной температуре. Время высыхания каждого слоя составляло 1 ч.



Удаление моделей производилось путем их выплавления в расплаве модельного состава.

Половина полученных образцов была прокалена в печи при температуре 900 °С в течение 4 ч.

Непрокаленные и прокаленные образцы испытывались на прочность при комнатной температуре. Прочность керамических форм оценивают испытанием образцов при статическом изгибе. Показания снимались на установке РМУ-1.

Прочность рассчитывалась по формуле

$$\sigma_{\text{н}} = 3Pl/(2bh^2),$$

где P – нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм; b – ширина образца, мм.

После исследования полученных образцов было выявлено, что наилучшей прочностью обладают образцы, изготовленные на основе жидкостекольной суспензии при следующих соотношениях наполнителей:

- 25 % глины, 75 % маршалита без активации глинистой составляющей;
- 25 % глины, 75 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором NaOH;

– 5 % глины, 95 % маршалита, глинистая составляющая активирована 5%-м раствором ортофосфорной кислоты.

При первом испытании приготавливалась суспензия на основе жидкого стекла при вышеуказанных соотношениях составляющих. Полученная суспензия наносилась на стандартные парафиновые модели и обсыпалась песком, затем образцы опускались на 4 мин. в отвердитель.

Сушка каждого слоя происходила при температуре 20 °С в течение 1 ч. Половина образцов была прокалена в печи при температуре 900 °С в течение 4 ч.

При испытании было выявлено, что полученные образцы обладают прочностью ниже технологической.

Исходя из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В ходе испытаний было выявлено, что наибольшим активирующим действием обладает омагниченная вода, пропущенная через постоянный магнит 3 раза. При активации глины щелочью наибольшим активирующим действием обладает 10%-й раствор NaOH. Выявлено, что при активации натриевой солью ортофосфорной кислоты наибольшим активирующим действием обладает 5%-й раствор.

2. Наибольший прогиб наблюдается у прокаленных образцов при следующих соотношениях наполнителей:

- 75 % глины, 25 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором ортофосфорной кислоты;
- 95 % глины, 5 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором NaOH.

У не прокаленных образцов наибольший прогиб наблюдается при следующем содержании ингредиентов: 75 % глины, 25 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором ортофосфорной кислоты.

Наименьший прогиб наблюдается у прокаленных образцов при следующих соотношениях наполнителей: 50 % глины, 50 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором NaOH.

У не прокаленных образцов наименьший прогиб наблюдается при следующих соотношениях наполнителей: 5 % глины, 95 % маршалита.

3. Наибольшая прочность наблюдается у образцов керамических форм при следующих соотношениях наполнителей:

- 25 % глины, 3...5 % маршалита, глинистая составляющая не активирована;
- 25 % глины, 25 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором NaOH;
- 5 % глины, 95 % маршалита, глинистая составляющая активирована 5%-м раствором ортофосфорной кислоты.

4. После отверждения образцов (25 % глины, 75 % маршалита, глинистая составляющая не активирована; 25 % глины, 75 % маршалита, глинистая составляющая активирована 10%-м раствором NaOH; 5 % глины, 95 % маршалита, глинистая составляющая активирована 5%-м раствором ортофосфорной кислоты) было выявлено, что полученные образцы обладают прочностью ниже технологической.

Таким образом, активация глины приводит к увеличению физико-механических свойств смеси, содержащей 25 % глины и 75 % маршалита, активированной 10%-м раствором щелочи NaOH.

Использование местных минеральных ресурсов при изготовлении оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям позволяет получать оболочковые формы, не уступающие по своим характеристикам полученным на этилсиликатных связующих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, В. В. Химическая активация наполнителя стержневых смесей и исследование физико-механических свойств стержней / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Н. В. Захарова // Литейное производство. – 2006. – № 2. – С. 7-8.
2. Петров, В. В. Улучшение свойств жидкостекольных смесей армированием / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Е. А. Тютинина // Литейное производство. – 2006. – № 7. – С. 13-16.
3. Петров, В. В. Стержневая смесь с использованием полистирола в качестве связующего раствора / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Н. В. Захарова // Литейное производство. – 2006. – № 7. – С. 17-18.
4. Модифицированные полимерно-жидкостекольные связующие для легковыбываемых форм и стержней / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Н. В. Захарова, Е. А. Тютинина // Проблемы сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения: сб. докладов третьей конф. Владивосток – Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2004 г. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. – С. 189-191.
5. Пат. 2243058 РФ МПК В22С 1/16, 9/00. Способ приготовления холодно-твердеющей смеси / Э. А. Дмитриев; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КНАГТУ». – № 2002123017/02; заявл. 27.08.2002; опубл. 27.12.2004. Бюл. № 36.
6. Пат. 2298449 РФ МПК В22С 1/18 Легковыбываемая жидкостекольная смесь и способ ее приготовления / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Е. А. Тютинина; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КНАГТУ». – № 2005118912/02; заявл. 17.06.2005; опубл. 10.05.2007. Бюл. № 13.



Абашкин Е. Е., Жилин С. Г., Комаров О. Н.
E. E. Abashkin, S. G. Zhilin, O. N. Komarov

**ВЛИЯНИЕ УПАКОВКИ КОМПОНЕНТОВ ТЕРМИТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ
ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА**

**PACKING INFLUENCE OF THERMITE FILLER COMPONENTS OF THE FLUX CORED
WIRE ON ELECTRIC ARC REMELTING PROCESSES**

Абашкин Евгений Евгеньевич – младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: abashkine@mail.ru.

Mr. Evgeny E. Abashkin – Junior Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: abashkine@mail.ru.

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Аннотация. В ряду технологических задач, связанных с изготовлением стальных конструкций, наиболее значимой представляется задача получения качественных неразъемных соединений с высокой эксплуатационной прочностью, которая достигается в результате применения сварочного процесса. При таком процессе соединение возникает после появления локальной зоны оплавления и последующего охлаждения на стыке соединяемых материалов. К недостаткам такого способа следует отнести: значительную трудоёмкость процесса, высокую стоимость сварочных материалов и расходов на электроэнергию. Устранить отмеченные недостатки возможно применением новых материалов, среди которых порошок на основе термитной композиции, состоящей из смеси отходов металлургического комплекса: оксида железа и алюминия. Такая смесь перспективна для получения проволоки с термитным порошковым наполнителем, применяемой при автоматической сварке под слоем флюса. Использование указанного процесса отличается понижением энергозатрат при одновременном увеличении качества получаемого неразъемного соединения. Исследование возможности повышения эффективности порошкового наполнителя на основе термитных смесей представляется актуальным. В работе ставится задача изучения влияния параметров упаковки порошкового термитного материала проволоки на объем получаемого металла в локальной зоне оплавления, определяющего возможность регулирования прочностных и геометрических характеристик соединения.

Summary. Among the technological tasks connected with production of steel structures, receiving of high-quality one-piece connections with high operational strength which is reached as a result of application of welding process is represented as the most significant. Connection occurs after emergence of a local burn-off zone and the subsequent cooling on a joint of the connected materials. The drawbacks of this method are the following: considerable labor input of process, high cost of welding materials and the cost of electricity. There are many methods to eliminate noted drawbacks: using new materials such as a powder based on the thermite mixture, consisting of metallurgical complex waste mixture: iron oxide and aluminum. Such mixture is perspective for receiving the wire with thermite powder filler used for automatic welding under a flux layer. The use of this process is characterized by a reduction in energy consumption, while increasing the quality of the received one-piece connection. The research of the possibility of increasing the efficiency of powder filler based on the thermite mixtures is relevant. The task of

the work is to study the packing influence of flux cored wire material parameters on the volume of the received metal in a local burn-off zone, which determines the possibility of regulation strength and geometric characteristics of the joint.

Ключевые слова: термитная смесь, химический состав, фракция, выход металлической фазы, экзотермическая реакция, железистые сплавы, электродуговой переплав, электрод, сердечник, порошковая проволока.

Key words: thermite mixture, chemical composition, fraction, metal phase output, exothermic reaction, iron-carbon alloys, electric arc remelting, electrode, core, flux-cored wire.

УДК 624.791

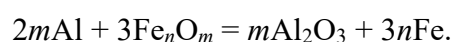
Введение

Получение качественных неразъемных соединений с высокой эксплуатационной прочностью представляется наиболее значимым в ряду современных технологических задач. Достижение высоких прочностных характеристик соединяемых элементов протяженных конструкций возможно в процессе локального оплавления и последующего охлаждения их стыковой зоны в результате применения сварочного процесса. Быстрое и качественное получение сварного соединения зависит от квалификации исполнителя работ и обеспечивается использованием высокопроизводительного оборудования, применяемыми сварочными материалами. Среди сварочных материалов сегодня находят широкое применение покрытые электроды для ручной дуговой сварки, проволока сплошного сечения и различные порошковые проволоки [1].

Получение сварного соединения с использованием порошковых проволок позволяет устранить ряд недостатков, характерных для других сварочных материалов и способных заметно снизить производительность: низкую степень защиты сварочной ванны от взаимодействия с внешней средой, значительные потери на угар и разбрызгивание, необходимость подготовительных операций, например, в виде сушки при использовании электродов; высокую вероятность неоднородности химического состава и неравномерности распределения легирующих элементов и примесей по сечению сплошной проволоки.

Порошковые проволоки представляют собой непрерывный электрод, как правило, в виде трубки, сердечник которой заполнен порошковой композицией, состоящей из минералов, химикатов, ферросплавов и т.д. [2]. Химический и гранулометрический составы материала сердечника зависят от назначения и требуемых свойств неразъемного соединения и призваны обеспечить высокое качество формирующегося шва при снижении стоимости и трудоемкости процесса [3].

Ввиду отмеченного выше для сердечника проволоки, применяемой для соединения элементов из низкоуглеродистых или низколегированных сталей при автоматической сварке под слоем флюса, наиболее предпочтительным представляется использование порошка на основе термитной композиции, имеющей в своем составе смесь отходов металлургического комплекса: оксида железа, восстановителя и добавок. Такой химический состав сердечника обусловлен необходимостью сокращения энергозатрат за счет тепловыделения в результате взаимодействия железной окалины с материалом восстановителя в ходе экзотермической реакции. Оксиды железа восстанавливаются до железа с ферритной структурой. Шлак, образующийся в результате реакции, более чем на 70 % состоит из Al_2O_3 , обладает большой теплоемкостью и защищает сварочный шов и околошовную зону от быстрого охлаждения. В рассматриваемом процессе окалину можно представить в виде Fe_nO_m , поскольку она может содержать оксиды железа с разной окисленностью: FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Ввиду того, что одним из продуктов окислительно-восстановительного процесса является Al_2O_3 , такую реакцию можно представить следующим выражением [4]:



В настоящее время применяется несколько вариантов шихт для порошковой проволоки, в составе которых в качестве восстановителя используют алюминиево-магниевый [5] либо алюми-



ниевый [6] порошки в соотношениях, позволяющих повысить коэффициент расплавления трубчатого электрода. При составлении термитной шихты применяют наполнители, в качестве которых в данном случае выступает материал самой проволоки, для изготовления которой применяется неполированная, особо мягкая лента из низкоуглеродистой стали холодной прокатки, выполненная согласно требованиям ГОСТ 503-81. Ширина и толщина ленты определяются требуемым диаметром электрода и технологией его изготовления.

В качестве легирующих и раскисляющих компонентов в порошках таких проволок применяют различные добавки, среди которых ферромарганец и ферросилиций. Присутствие последних направлено на обеспечение требований соответствия марке и виду получаемого сплава, прочностных характеристик соединения в зоне стыка. Содержание добавок и ферросплавов в термитной шихте определяют по формуле [7]

$$m_{\phi} = [m_{\tau}(\phi - \mathcal{E}_{\tau\phi}) + m_{\text{н}}(\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{н}\phi})] / (\mathcal{E}_{\phi\phi} - \mathcal{E}),$$

где m_{ϕ} – масса ферросплава, кг; m_{τ} – масса термита, кг; ϕ – выход термитной стали; $m_{\text{н}}$ – масса наполнителя, кг; \mathcal{E} , $\mathcal{E}_{\tau\phi}$, \mathcal{E}_{ϕ} и $\mathcal{E}_{\text{н}}$ – среднее содержание химического элемента соответственно в металле, исходной термитной стали, ферросплаве и наполнителе, %.

Однако идентичность структуры и свойств соединяемых металлических элементов и зоны термического влияния, как правило, не достигается, что приводит к искажению геометрических характеристик конструкции и определяет актуальность изучения тепловых процессов, происходящих в сварочной ванне, а также методов их регулирования, в том числе посредством изменения параметров порошкового материала в проволочном электроде: химического и фракционного состава компонентов, плотности упаковки наполнителя и равномерности распределения компонентов в объеме смеси.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния технологических параметров подготовки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на объем получаемого металла в локальной зоне оплавления, определяющего возможность регулирования прочностных и геометрических характеристик неразъемного соединения.

В рамках указанной цели в работе решались следующие задачи:

- определение оптимального химического и фракционного составов компонентов исходной порошковой термитной смеси;
- исследование зависимости насыпной плотности, интенсивности горения и выхода восстановленного металла от времени механической обработки компонентов термитной смеси.

Порошковые компоненты термитных шихт, как правило, представляют собой полидисперсные системы, состоящие из частиц различной крупности. Существенное расхождение параметров гранулометрического состава шихтовых компонентов, вызванное различием физико-механических характеристик применяемых материалов, определяет неравномерность распределения компонентов в порошковом теле сердечника по завершению его упаковки в электрод. Значительно снизить сепарацию компонентов по плотности возможно выравниванием гранулометрических показателей смеси: фракции и формы компонентов.

Экспериментально определено, что наиболее предпочтительным для обеспечения массового выхода восстановленного в ходе экзотермической реакции металла является диапазон значений 20...30 % содержания восстановителя на основе алюминиевых сплавов в порошковой термитной смеси [8, 9]. Использование порошковой шихты с содержанием в ней восстановителя меньшим, чем указано в этом диапазоне, приводит к сокращению массового выхода получаемого металла до 1,5 раз; использование восстановителя в количестве более 30 % на изменение выхода термитного металла влияет незначительно, но приводит к высокому содержанию остаточного алюминия в конечном продукте.

Достижение требуемых показателей восстановления и теплогенерации термитного наполнителя порошковой проволоки обеспечивается использованием химически чистых составляющих термитной смеси. Однако выбор химического и фракционного составов сердечника в производственных условиях регламентируются в большей степени практическими соображениями, опреде-

ляемыми сечением электрода, фактическим наличием, способом получения и подготовки материалов. Это обстоятельство в известной степени усложняет расчет состава термитной шихты.

Термитная шихта представляет собой многокомпонентную порошковую смесь, неравномерное послойное распределение которой в сердечнике может оказать значительное влияние на качество сварных соединений. Компоненты, не вступившие в реакцию, после ее завершения могут перейти в шлак, изменить химический состав ванны, сократить массу восстановленного металла, дестабилизировать процесс горения дуги и, как следствие, оказать влияние на формирование геометрии и прочностных свойств сварного шва.

Для приготовления исходной термитной шихты использовали порошки, внешний вид которых представлен на рис. 1, содержащие железную окалину (Fe_2O_3), алюминий (Al), ферромарганец ФМн78(А) (ГОСТ 4755-91), ферросилиций ФС50 (ГОСТ 1415-93), порошок графитированных электродов ЭГ15 (ТУ 14-139-177-2003) фракций 0,16...0,315 мм, полученных рассевом на ситах модели 026 (ГОСТ 29234.3-91). Наличие графита в составе термитной шихты в количестве 0,1...4 % по массе позволяет обеспечить соответствие его содержания в ванне расплава низкоуглеродистым и низколегированным маркам сталей. Таким образом, обеспечивается требуемое содержание углерода в структуре получаемого соединения.

Указанный фракционный состав компонентов смеси представляется наиболее технологически предпочтительным, т.к. позволяет получить удовлетворительное качество упаковки продукта и обеспечивает стабильность его горения.

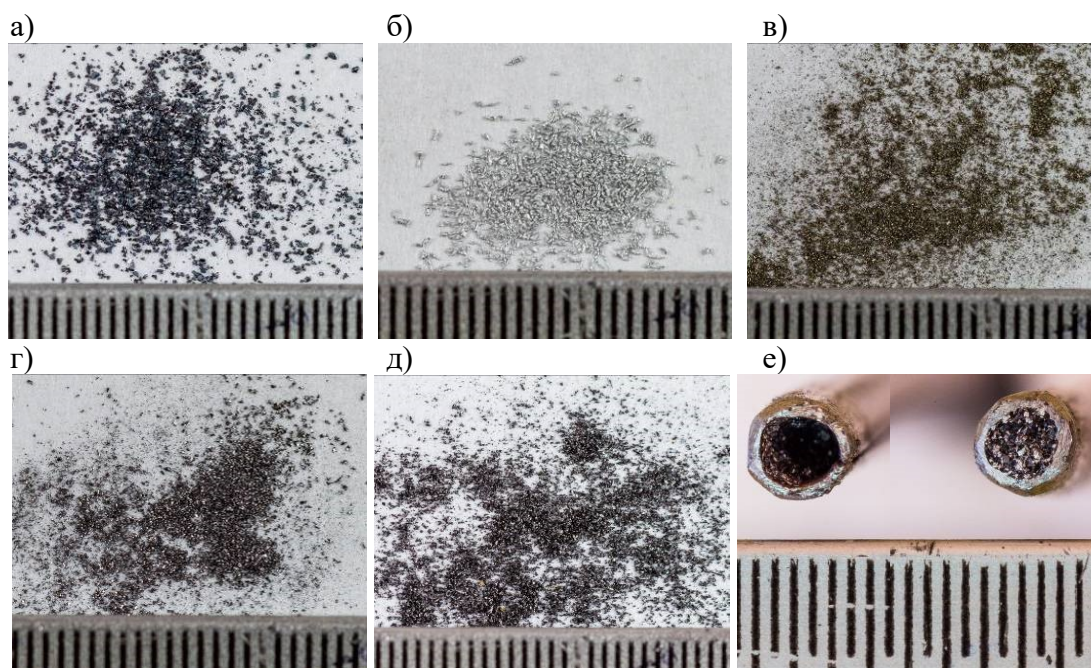


Рис. 1. Форма и сравнительные размеры частиц исходных компонентов термитных смесей: а – порошок железной окалины, фракция 0,2...1,5 мм; б – стружка алюминиевого сплава, фракция 0,2...1,5 мм; в – порошок ферромарганца ФМн78(А) по ГОСТ 4755-91, фракция 0...0,4 мм; г – порошок ферросилиция ФС50 (ГОСТ 1415-93); д – порошок графитированных электродов ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003, фракция 0...0,063 мм; е – внешний вид среза порошковой проволоки с термитным наполнителем

На рис. 1 видно, что формы частиц различных компонентов не идентичны, что определяется технологическими особенностями их получения. Так, например, ферросплавы получены дроблением кусковых материалов и после сепарации представляют собой частицы со значительным количеством сколов и острых граней. Частицы окалины, как правило, плоские, с характерными заостренными краями. Фракция материала восстановителя получена распылением жидкого алю-

миниевого сплава с последующим рассевом. Форма восстановителя преимущественно представлена хлопьевидными вытянутыми частицами со скругленными краями.

Характеристикой качества упаковки является коэффициент заполнения (K_3) сердечника порошковой проволоки. На рис. 1, *e* слева представлен внешний вид среза порошковой проволоки со значением коэффициента заполнения сердечника $K_3 \leq 0,15$, справа – проволока с коэффициентом заполнения $0,15 < K_3 \leq 0,4$, при котором обеспечивается максимальный массовый выход восстановленного металла и технологически приемлемая воспламеняемость смеси. K_3 порошковой проволоки с термитной шихтой определяется выражением [10]

$$K_3 = M_{\text{ТШ}} / (M_3 + M_{\text{ТШ}}),$$

где $M_{\text{ТШ}}$ – масса термитной шихты; M_3 – масса электрода.

Параметр K_3 связан с плотностью упаковки сердечника, для определения влияния которой на физико-химические процессы, протекающие в ходе экзотермической реакции, была проведена серия экспериментов.

Получение порошковой проволоки с максимально возможным значением параметра K_3 , а также достижение полноты прохождения реакции и, следовательно, максимального выхода восстановленного металла возможны при использовании равного фракционного и гранулометрического составов компонентов термитной шихты. Диапазон исходных размеров частиц компонентов, используемых при составлении шихт для сердечника проволоки с $\varnothing = 2,8$ мм, фактически составляет 0,1...0,4 мм. Значительное расхождение значений плотности компонентов термитной шихты и различие в размерах не позволяют получить упаковку сердечника с равномерным распределением элементов по его сечению, что оказывает влияние на структуру и свойства сварного соединения.

С целью минимизации расхождения размеров фракций компонентов и увеличения насыпной плотности термитная шихта подвергалась обработке в шаровой мельнице типа МШ-20 в течение 60 мин. Визуализация результата такого совместного дробления компонентов термитной смеси получена при помощи электронного растрового сканирующего микроскопа ZEISS EVO LS10 и представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что линейные размеры частиц окислы уменьшаются после дробления до 2 раз, а частицы восстановителя приобретают более глобулярную форму, обеспечивая увеличение площади контакта компонентов термитной шихты. Последнее определяет увеличение насыпной плотности термитной шихты, что в свою очередь приводит к более полному прохождению экзотермической реакции и, следовательно, оказывает влияние на выход восстановленного металла.

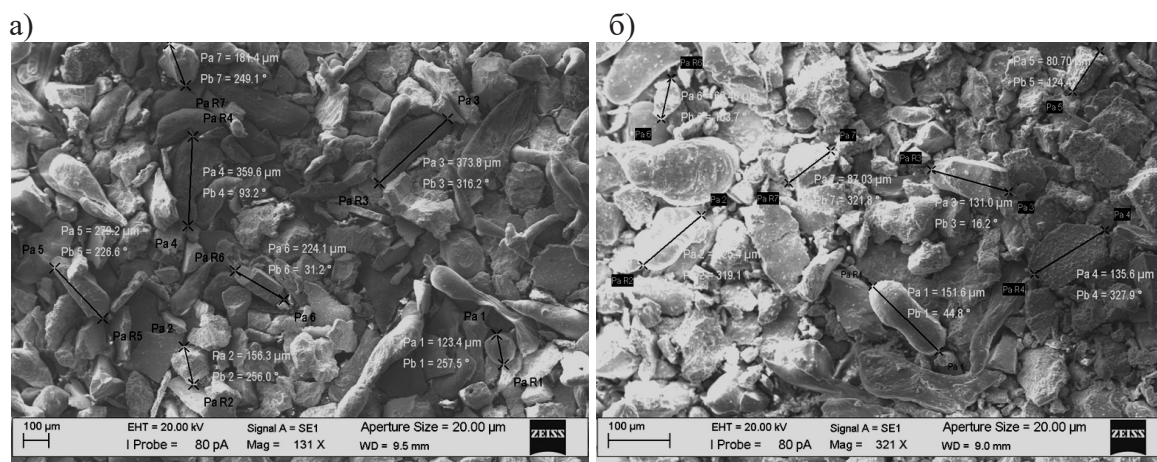


Рис. 2. Фракционный состав компонентов термитной шихты:
а – до обработки в шаровой мельнице; б – после обработки

Таким образом, технологически важным является определение времени механической обработки термитной шихты, при котором достигается максимальное значение ее насыпной плотности. На рис. 3 представлена зависимость изменения насыпной плотности термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице.

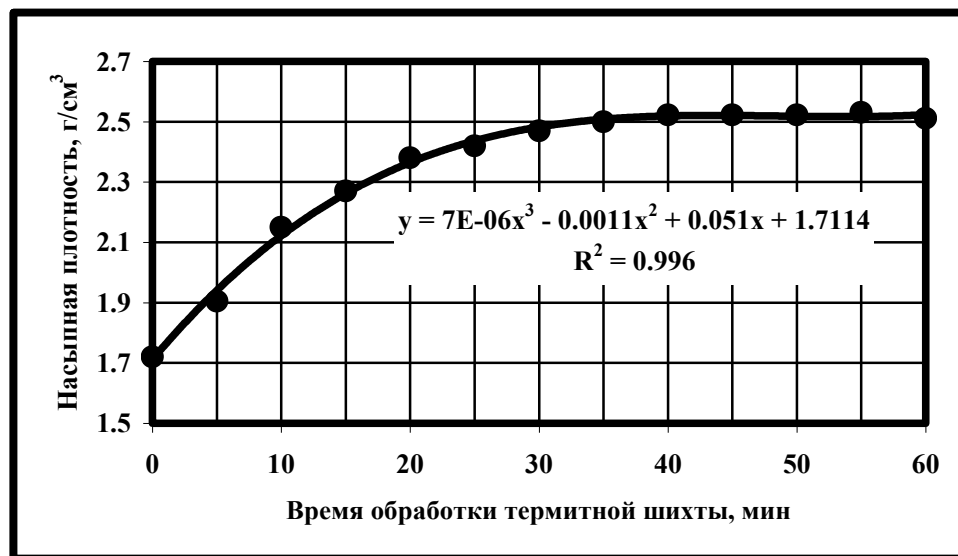


Рис. 3. Зависимость изменения насыпной плотности термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице

Из рис. 3 следует, что по истечении 30...40 мин. значение насыпной плотности термитной смеси составляет 2,5 г/см³ и дальнейшая ее обработка не представляется целесообразной ввиду незначительного увеличения исследуемого параметра.

Для корректного составления термитной шихты с целью практической реализации технологии применения порошковой проволоки с термитным наполнителем необходим учет интенсивности горения и массового выхода восстановленного металла.

В ходе эксперимента интенсивность горения шихты определяли временем, фиксация которого осуществлялась с момента начала экзотермической реакции до ее завершения в навеске смесей массой 0,1 кг с различной насыпной плотностью. На рис. 4 представлена зависимость отмеченного выше показателя от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице.

Совместный анализ данных, представленных на рис. 3 и 4, показал, что максимальное значение насыпной плотности до 2,5 г/см³ достигается в интервале времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице 30...40 мин., что соответствует максимальной интенсивности горения термитной шихты, значение которой в этом диапазоне времени достигает 21 г/с. При дальнейшей обработке в шаровой мельнице термитной шихты интенсивность ее горения не увеличивается.

Важным технологическим параметром сварочного процесса является масса наплавленного металла, что обуславливает необходимость определения массового выхода восстановленного металла при изменении насыпной плотности термитной шихты, задействованной в экзотермической реакции. Изменение массового выхода металла определяли следующим образом: в равных объемах термитной шихты с различными значениями насыпной плотности, полученными при различном времени обработки шихты в шаровой мельнице, инициировали экзотермическую реакцию и регистрировали массу металла, образовавшегося по завершении процесса расплавления. Размерность значений массового выхода представлена в процентах. На рис. 5 представлена зависимость массового выхода восстановленного металла от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице.

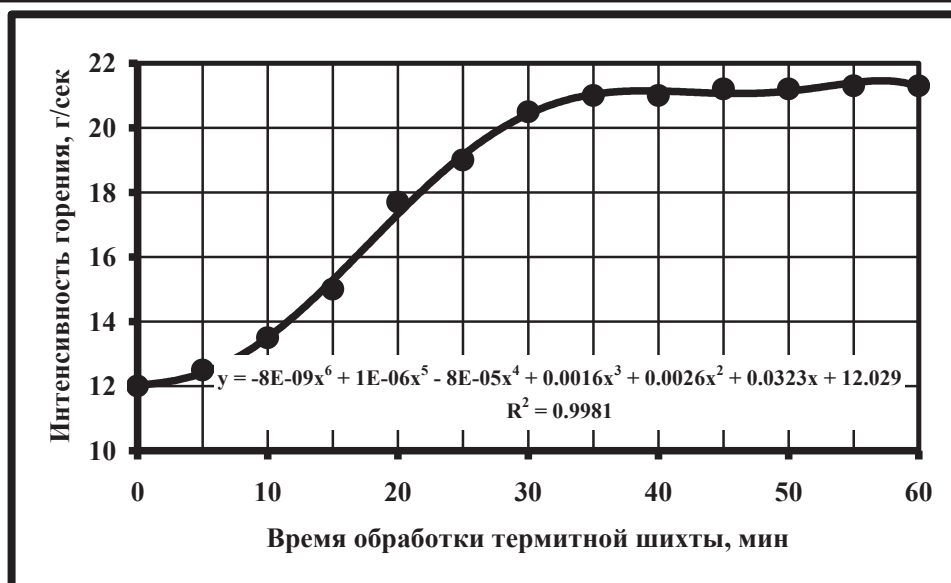


Рис. 4. Зависимость интенсивности горения термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице

Из рис. 5 видно, что максимальное значение массового выхода металла (до 50 %) наблюдается при осуществлении экзотермического процесса в термитных смесях, обработанных в мельнице в течение 30...40 мин., а значит, согласно данным, представленным на рис. 3, достигших значения насыпной плотности перед началом реакции 2,5 г/см³. Некоторое снижение массового выхода металла после 40 мин. обработки в шаровой мельнице объясняется, по-видимому, «повторной сепарацией» компонентов, обусловленной снижением размеров частиц окалины при неизменности размеров частиц восстановителя. Поскольку при свободной засыпке термитной шихты существенно увеличить ее насыпную плотность не удастся, то продолжение предварительной обработки шихты не представляется целесообразным.

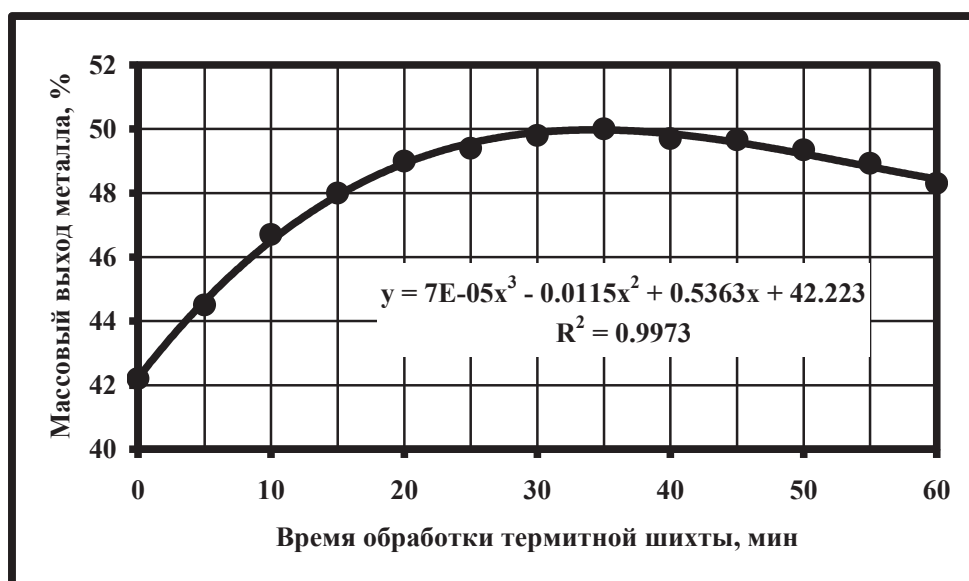


Рис. 5. Зависимость массового выхода восстановленного металла от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице

Таким образом, технологически обоснованным представляется применение процесса предварительной подготовки материалов наполнителя порошковой проволоки перед их упаковкой в сердечник, заключающийся в обработке термитной шихты в течение 30...40 мин. в шаровой мельнице. Такая предварительная обработка позволяет повысить однородность фракционного и гранулометрического составов термитной шихты, что определяет увеличение интенсивности ее горения и достижение значения выхода металла 50 % от массы веществ, вступающих в реакцию.

Последующее применение термитной шихты связано с изменением параметров порошкового тела, а именно его уплотнением. Прошедшие предварительную подготовку компоненты смеси дозируются в формирующее устройство, где происходит заполнение термитной шихтой трубчатой металлической оболочки проволоки. Полученная заготовка обжимается на волочильной машине до требуемого диаметра и уже в виде проволоки наматывается на кассеты.

Во время упаковки в проволочный электрод плотность термитной шихты увеличивается в 1,2...1,6 раз. Увеличение плотности упаковки термитной шихты направлено на решение таких задач, как сокращение размеров технологической оснастки и повышение массового выхода восстановленного из термитной шихты металла. Это обстоятельство определяет необходимость учета массового выхода восстановленного в ходе экзотермической реакции металла при формировании ванны расплава в зоне стыка соединяемых деталей.

Для получения экспериментальных зависимостей массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей последние (как предварительно обработанные в шаровой мельнице, так и не подвергавшиеся такой обработке) посредством одностороннего прессования уплотняли в замкнутом объеме цилиндрической формы до значений плотности, превышающих первоначальные значения в 1,2...1,6 раз. Масса навески термитной шихты в каждом опыте составляла 0,1 кг. Форма уплотненных навесок термитной шихты различной плотности соответствовала диапазону отношения диаметра основания (D) к высоте прессовки (H): $H = (1...1,4)D$. Такие размерные параметры обеспечивают минимальное расхождение значений плотности прессовки по ее высоте. На рис. 6 представлены зависимости массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей уплотненных.

Из анализа рис. 6 видно, что наибольший выход металла (до 53 % от массы шихты) достигается при плотности упаковки смеси 3,25 г/см³. Использование уплотненного наполнителя сердечника из предварительно обработанной в шаровой мельнице термитной шихты позволяет увеличить выход металла на 6 % в сравнении с использованием неуплотненной термитной смеси и на 8...10 % – с применением неподготовленной уплотненной термитной шихты.



Рис. 6. Зависимости массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей уплотненных: 1 – без обработки в шаровой мельнице; 2 – после обработки в шаровой мельнице



Результаты проведенных исследований использованы при изготовлении образца порошковой проволоки с наполнителем из термитной шихты, предварительно обработанной в шаровой мельнице.

Таким образом, подготовка термитной смеси технологически оправдана и позволяет увеличить массовый выход восстановленного металла, что оказывает влияние на увеличение протяженности и повышение качества сварного шва из термитного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин, В. А. Исследование влияния конструктивных особенностей и химического состава наполнителя, порошковых проволок на режимы электродуговой сварки / В. А. Рыбин, В. А. Иванов // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 7(32). – С. 55-59.
2. Яковлев, Д. С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой / Д. С. Яковлев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 92-95.
3. Порошковые и композиционные проволоки для сварки и наплавки: учеб. пособие / Г. Н. Соколов, Ю. Н. Дубцов, И. В. Зорин, А. А. Артемьев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 128 с.
4. Получение литья повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин, В. В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 11. – С. 6-11.
5. А. с. СССР № 835682. Шихта порошковой проволоки / А. В. Зареченский, А. А. Колечко, Н. А. Шепель, А. С. Суржиков, М. П. Муратова; заявл. 15.06.1979; опубл. 07.06.1981. Бюл. № 21. – 2 с.
6. Пат. РФ № 2454309. Порошковая проволока // И. Г. Сапченко, Е. Е. Абашкин; заявл. 30.06.2010; опубл. 27.06.2012. Бюл. № 18.
7. Новохацкий, В. А. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В. А. Новохацкий, А. А. Жуков, Ю. И. Макарьчев. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
8. Исследование влияния фракции компонентов алюмотермитной смеси на технологические параметры получения термитных сталей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, В. В. Предеин, Е. Е. Абашкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 33-37.
9. Использование алюминиевого сплава с высоким содержанием примесных элементов в качестве восстановителя для получения сортовых марок сталей при алюмотермии / В. В. Предеин, А. В. Попов, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, А. И. Евстигнеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № III-1(31). – С. 106-114.
10. Рыбаков, В. М. Сварка и резка металлов / В. М. Рыбаков. – М.: Высш. шк., 1979. – 214 с.

Иваненко В. Ф.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ
ТУГОПЛАВКИХ ИНОКУЛЯТОРОВ В ЧУГУНЕ

Иваненко В. Ф.

V. F. Ivanenko

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСТВОРЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ИНОКУЛЯТОРОВ В ЧУГУНЕ

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE KINETICS OF THE FUEL INDUCERS DISSOLUTION IN CAST IRON

Иваненко Виктор Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория и методика технологического образования» Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Кирова, 17. E-mail: knavitiv@yandex.ru.

Mr. Victor F. Ivanenko – PhD in Engineering, Associate professor, Theory and Methods of Technological Education Department, Amur State University of Humanities and Pedagogy (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681000, Komsomolsk-on-Amur, 17, Kirov ave. E-mail: knavitiv@yandex.ru.

Аннотация. Эффективность и стабильность воздействия вводимых в металл присадок при суспензионной заливке литейных форм с целью повышения физико-механических свойств определяется их равномерностью распределения и растворения. Кинетика растворения вводимых в металл присадок представляет собой процесс, обусловленный не только теплообменом, но и массообменом, в котором диффузионные процессы доминируют, если материал присадок имеет температуру плавления выше, чем температура плавления расплава. Для изучения кинетики растворения тугоплавких присадок использовался экспериментальный метод, в процессе которого определялось время растворения гранул инокулятора. На основании экспериментальных данных была разработана математическая модель кинетики растворения вводимых в металл присадок, которая более реально отражает условия растворения тугоплавкого инокулятора в расплаве.

Summary. The effectiveness and stability of the additives effect introduced into the metal during the suspension casting of molds with the aim of improving the physical and mechanical properties is determined by their uniformity in distribution and dissolution. The dissolution kinetics of the additives introduced into the metal is a process caused not only by heat exchange but also by mass exchange in which the diffusion processes dominate if the additive material has a melting point higher than the melting point of the melt. To study the kinetics of dissolution of refractory additives, an experimental method was used to determine the dissolution time of the granules of the inoculator. Based on experimental data, a mathematical model of the kinetics of dissolution of additives introduced into the metal was developed, which more effectively reflects the dissolution conditions of the refractory inoculum in the melt.

Ключевые слова: кинетика растворения, тугоплавкий инокулятор, молекулярная диффузия, математическая модель.

Key words: kinetics of dissolution, refractory inoculator, molecular diffusion, mathematical model.

УДК 621.74.04:532.584

Эффективность и стабильность инокулирующего действия при вводе инокуляторов в форму определяются кинетикой растворения и равномерностью распределения этих добавок в период заливки формы.

В свою очередь кинетика растворения вводимых в металл присадок зависит от условий тепло- и массопереноса, влияние которых изучено недостаточно и представляет большой теоретический и практический интерес.

Расхождение в полученных данных, как отмечают авторы работы [1], связано с тем, что недостаточно изучен вопрос диффузионного растворения инокуляторов, особенно в том случае, когда температура плавления гранул выше температуры расплава.

В своей работе С. С. Затуловский [2] отмечает, что в случае, когда материал инокулятора и кристаллизующая фаза имеют близкие теплофизические характеристики, кинетика растворения инокулятора представляет собой процесс, обусловленный только теплообменом. Тогда время плавления частицы в расплаве составит

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{плс}} + \tau_{\text{пл}},$$

где $\tau_{\text{н}}$ – время на замерзания расплава на частице; $\tau_{\text{плс}}$ – время плавления намерзшего слоя; $\tau_{\text{пл}}$ – время плавления нагретой частицы.

Если же инокулятор и кристаллизующая фаза по химическому составу различаются, то процесс плавления обусловлен не только теплообменом, но и массообменом. Причем плавление частиц инокулятора, если инокулятор имеет температуру плавления выше, чем температура перегрева расплава, определяется процессом диффузионного растворения вещества инокулятора:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{плс}} + \tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{диф}},$$

где $\tau_{\text{диф}}$ – время диффузионного растворения частицы.

В свою очередь Э. М. Гольдфарб [3] так же отмечает, что скорость плавления каждого элементарного слоя частицы определяется процессом насыщения этого слоя примесью, концентрация которой соответствует равновесной температуре ликвидус расплава. Таким образом, при диффузионном растворении тугоплавких инокуляторов, например гранул чистого хрома, наблюдается период, когда диффузионный перенос атомов углерода в железе из пограничного слоя расплава к поверхности раздела фаз чугуна-хром, а атомов хрома в пограничный слой расплава способствует насыщению углеродом и железом поверхностного слоя хрома, теплообмену между расплавом и твердой фазой и равномерному распределению инокулятора в объеме жидкого металла.

Для изучения кинетики растворения данного инокулятора авторами работы [4] был предложен экспериментальный метод. Кроме исследования гранул хрома, исследовали кинетику того же диаметра. Гранула исследуемого инокулятора приклеивалась жидким стеклом к подножке, изготовленной из тугоплавкого материала. С гранулой соприкасается заостренный вольфрамовый стержень с грузом. Перемещения стержня в процессе плавления гранулы фиксировались емкостным датчиком с чувствительностью $(0,6 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$ мм. Изменения линейного размера гранулы относительно времени её растворения записывались двухкоординатным самопишущим прибором. Кинетику плавления гранул исследовали при температуре 1450...1500 °С. В этом диапазоне температур заливки чугуна определяющими факторами процесса являются одновременно тепловой и диффузионный факторы. При анализе кривых кинетики (см. рис. 1) растворения исследуемых инокуляторов было выявлено, что в течение периодов намерзания расплава на гранулы уменьшение размеров гранулы не наблюдалось. Длительность этих периодов неодинакова для различных материалов. Для чугуна и стали она составляет 0,1...0,2 с, для хрома – 1,5 с. По всей видимости, продолжительность этого периода зависит от теплопроводности материала инокулятора. После прогрева инокулятора процесс растворения инокулятора складывается из двух механизмов:

1. взаимодействия граничного слоя, в котором концентрация хрома $c \leq c_{\text{кр}}$, где $c_{\text{кр}}$ – концентрация хрома, при которой температура плавления возникающего граничного слоя появляется вследствие молекулярной диффузии хрома в чугун;
2. оплавления граничного слоя.

При растворении инокулятора одновременно происходят процесс молекулярной диффузии и процесс оплавления граничного слоя. Определяющим и наиболее длительным по времени является процесс молекулярной диффузии. Поэтому для описания растворения тугоплавкого инокулятора необходимо изучить термодиффузионный процесс между частицей хрома и расплавом чугуна.

В работе [5] изучались процессы диффузии в случае, когда инокулятор состоит из практически чистого железа (порошок армко-железо вводился в углеродистую сталь). Малая концентрация примеси позволяет свести задачу к решению диффузного уравнения

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right], \quad (1)$$

где D – постоянный коэффициент диффузии.

При этом можно было полагать, что коэффициент термодиффузии K_T равен нулю. Очевидно, что в случае с хромистым инокулятором эти предположения (о малости концентрации примеси) неверны и для создания более реальной математической модели необходимо рассматривать следующую систему термодиффузии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= D \left(\Delta C + \frac{K_T}{T} \cdot \Delta T \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{K_T}{C_p} \cdot \left(\frac{\partial M}{\partial C} \right)_{p,T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} &= \chi \cdot \Delta T, \end{aligned} \quad (2)$$

где M – химический потенциал; χ – коэффициент теплопроводности; C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

В этой системе коэффициенты диффузии D и термодиффузии нелинейным образом зависят от концентрации C . Эта система сложна как для решения, так и для исследования. Однако экспериментальные данные показывают, что время нагрева инокулятора мало по сравнению со временем его растворения (см. рис. 1).

Поэтому можно полагать, что процесс диффузии, время которого определяет время растворения инокулятора, происходит тогда, когда на поверхности раздела чугун-инокулятор установилось равномерное температурное поле. Это означает, что в системе (2) в первом уравнении $\Delta T = 0$. В силу этого можно рассматривать уравнение (1), но полагая, что D зависит от C . При этом уравнение по-прежнему остаётся нелинейным.

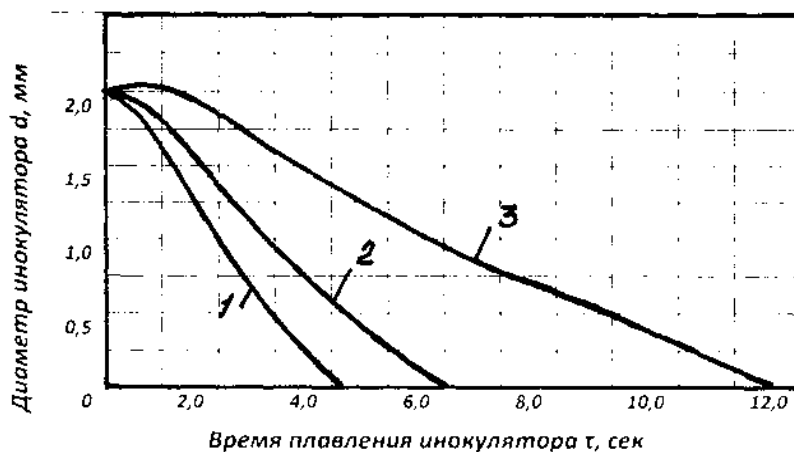


Рис. 1. Динамика плавления гранул инокулятора:
1 – гранула чугуна; 2 – стальная гранула; 3 – гранула хрома

Уравнение (1) необходимо дополнить начальными и граничными условиями:

$$C(r, 0) = 1, 0 \leq r \leq R,$$

где R – радиус инокулятора;

$$C(0, t) = 1, 0 \leq t \leq \tau_p,$$

где τ_p – время растворения инокулятора;

$$C(R, t) = C',$$

где C' – концентрация хрома в чугунае.

Для решения поставленной задачи необходимо знать функцию $D = D(C)$. Для нахождения этой зависимости рассмотрим начальную краевую задачу для линейного уравнения (1). Решение этой задачи имеет вид

$$C(r, t) = C' \left[1 + 2 \frac{R \cdot \sin \pi \frac{r}{R}}{r \cdot \pi} \exp \left(-\pi^2 \cdot \frac{D \cdot t}{r^2} \right) \right]. \quad (3)$$

Разобьём интервал $[0, \tau_p]$ на N интервалов длины $\Delta t = \frac{(\tau_p - \tau_n)}{N}$, где τ_n – время нагрева инокулятора. По экспериментальной кривой (см. рис. 1) найдем $r_i = r(t_i)$, где $t_i = \Delta t \cdot i + \tau_n$. Представим найденные значения r_i и t_i в (3), полагаем при этом $C(r_i, t_i) = C_{кр}$, находим значения

$$D_e = \frac{R^2}{\pi^2 \cdot t_i} \left[C' - C_{кр} + \ln \left(\frac{2R \cdot \sin \pi \frac{R}{r_i}}{r_i \cdot \pi} \right) \right].$$

Припишем найденное значение D_i к значению концентрации C_i , которая определяется как среднее значение концентрации по объёму инокулятора при $t = t_i$ по следующей формуле:

$$C_i = \frac{3}{4\pi \cdot R^2} \sum_0^R \sum_0^{2\pi} \sum_0^\pi l(r, t_i) \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot dr d\varphi.$$

Таким образом, мы определили $N + 1$ значение D_i и соответствующих C_i . Для нахождения зависимости коэффициента от концентрации мы воспользовались соотношениями, справедливыми лишь для линейной модели. Нам же необходимо решить нелинейную задачу. Поэтому, полагая, что функция $D(C)$ кусочно-линейная, т.е. при $C_{l-1} \leq C \leq C_l$ D меняется по линейному закону $D = D_{l-1} + K_l(C - C_{l-1})$, где $K_l = \frac{(D_l - D_{l-1})}{(C_{l-1} - C_l)}$.

Для решения линейной задачи запишем её конечно-разностную формулу для последующего решения на ЭВМ. С этой целью интервал $[0, \tau_p]$ разобьём на n интервалов длины $\Delta t = \frac{\tau_p}{n}$, а интервал $[0, R]$ разобьём на m интервалов длины $\Delta r = \frac{R}{m}$. Обозначая через C_{ij} значения C в точке (t_i, r_j) , где $t_i = \Delta t \cdot j$, $r_j = \Delta r \cdot j$, получаем следующие конечно-разностные соотношения для уравнения (1):

$$\frac{C_{ij} - C_{i-1,j}}{\Delta t} = D_{ij} \left[\frac{C_{i-1,j} - 2C_{i-1,j} + C_{i-1,j+1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_j} \cdot \frac{C_{i-1,j} - C_{i-1,j-1}}{\Delta r} \right],$$

откуда получаем рекуррентную формулу:

$$C_{ij} = C_{i-1,j} + \Delta t \cdot D_{ij} \left[\frac{C_{i-1,j} - 2C_{i-1,j} + C_{i-1,j+1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_j} \cdot \frac{C_{i-1,j} - C_{i-1,j-1}}{\Delta r} \right],$$

где

$$D_{ij} = \begin{cases} D_{l-1} + K_l (C_{ij} - C_{l-1}), \\ \text{если } C_{l-1} \leq C_{ij} \leq C_l, \\ l = 1, 2 \dots N. \end{cases}$$

Данная математическая модель более реально отражает условия растворения тугоплавкого инокулятора в расплаве. Проводя дискретизацию начальных и краевых условий по r , t и используя последнее рекуррентное соотношение с помощью ЭВМ, составив программу, можем получить значение C_i в узловых точках разностей сетки. Используя результаты численного счёта, можем определить время растворения инокулятора любого диаметра.

Таким образом, найденная с помощью экспериментальных данных и линейной модели зависимость $D(C)$ позволила создать математическую модель, более реально отражающую условия растворения тугоплавкого инокулятора в расплаве. Одно из применений проведенного расчёта состоит в следующем: используя выражение для коэффициента диффузии, полученного выше, мы можем решить задачу растворения инокуляторов произвольных начальных диаметров с произвольной начальной концентрацией хрома в них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириевский, Б. А. Определение времени расплавления гранул в расплаве / Б. А. Кириевский, В. Л. Черкасский // Суспензионное литьё: сб. науч. тр. – Киев: НПЛ, АН УССР, 1977. – С. 55-59.
2. Затуловский, В. В. Суспензионная разливка / В. В. Затуловский. – Киев: Наукова думка, 1981. – 260 с.
3. Гольдфарб, Э. М. Теплотехника металлургических процессов / Э. М. Гольдфарб. – М.: Металлургия, 1967. – 439 с.
4. Иваненко, В. Ф. Кинетика растворения тугоплавких инокуляторов в чугуне / В. Ф. Иваненко, С. Ю. Маркаров, В. Н. Носов // Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа: тезисы докладов III Всесоюзн. науч. конф. – Днепропетровск: ДМетИ, 1986. – С. 220-221.
5. Хомуецкая, С. И. Влияние микрохолодильников на перераспределение ликвирующих примесей / С. И. Хомуецкая // Суспензионное литье. Т. 31. Вып. 15. – Горький: ГПИ, 1975. – С. 33-39.



Фадеев В. С., Афанасьева А. А., Ким В. А.

V. S. Fadeev, A. A. Afanasyeva, V. A. Kim

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МУФТ СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

INVESTIGATION OF FRICTION COMPOSITE MATERIAL MICROSTRUCTURE FOR ELECTRIC DRIVE COUPLINGS

Фадеев Валерий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «РОМБ». E-mail: infotech.mos@gmail.com.

Mr. Valeriy S. Fadeev – Doctor of Engineering, Professor, General Director of JSC «ROMB». E-mail: infotech.mos@gmail.com.

Афанасьева Анна Алексеевна – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

Ms. Anna A. Afanasyeva – a Post Graduate Student, Material Technology and New Material Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

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

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Material Technology and New Material Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kim.va@email.knastu.ru.

Аннотация. Проведены комплексное исследование микроструктуры фрикционного композиционного материала, включающего компьютерную металлографию, выполненную с помощью программного обеспечения Image.Pro.Plus 5.1, и механические испытания на специальном стенде с электроприводом СП-6. Определены оптимальная микроструктура материала и режимы его спекания, обеспечивающие стабильные условия работы фрикционных дисков муфт стрелочных электроприводов. Стабильные условия работы фрикционной муфты оценивались по величине силы тока, потребляемого электродвигателем привода, и ее колебаниям при проскальзывании фрикционных дисков.

Summary. Complex research of the frictional composite material microstructure including the computer metallography executed with the help of Image.Pro.Plus 5.1 software, and mechanical tests at the special panel with the SP-6 electric drive is conducted. The authors define the optimum microstructure of material and the modes of its agglomeration providing stable operating conditions of frictional disks of the electric point machine couplings. Stable operating conditions of the frictional coupling were estimated depending on current intensity consumed by the electric motor, and its fluctuations when slipping frictional disks.

Ключевые слова: микроструктура, композиционный материал, муфта, сила тока, трение, износ.

Key words: microstructure, composite material, coupling, current intensity, friction, wear.

УДК 621

Введение

Важными показателями стрелочных электроприводов являются надежность и эксплуатационная стабильность фрикционных муфт, обеспечивающие постоянство коэффициента трения в широком диапазоне изменения температуры и влажности внешней среды, отсутствие вибраций, механическую прочность, износостойкость и способность создавать нормативные контактные

нагрузки. При разработке новых материалов для фрикционных муфт стрелочных электроприводов решаются две основные задачи: повышение износостойкости и стабильность коэффициента трения. Износостойкость обеспечивается созданием псевдосплавов на основе железной матрицы, легированных молибденом, никелем и другими химическими элементами [1]. Стабильность коэффициента трения достигается путем подбора состава исходных порошков, режимов спекания и механической обработки для достижения необходимой структурной организации материала.

Работа фрикционного материала муфт электроприводов протекает в неравновесных условиях трения и изнашивания, поэтому эксплуатационная надежность этого сопряжения будет определяться свойствами вторичных диссипативных структур, образующихся в процессе контактного взаимодействия. Стабильность коэффициента трения прямым образом зависит от функционирования диссипативных структур, обеспечивающих механическую прочность и отток тепла из зоны фрикционного контакта. Работа диссипативных структур заключается в формировании стабильных динамических потоков носителей пластической деформации и тепла, при этом большая часть диссипации механической энергии в тепло обеспечивается за счет работы внутреннего трения в результате межзеренного скольжения. Из этого следует, что важной особенностью структурной организации фрикционного материала становится развитость межзеренных и межфазных границ, которая обеспечивает не только высокую активность диссипативных механизмов, но и механическую прочность и термическую устойчивость материала [2; 3].

В статье приводятся результаты исследований по разработке новых фрикционных материалов, получаемых методом порошковой металлургии, определению режимов спекания и термической обработки для получения структурного состояния материала, обеспечивающего стабильность коэффициента трения и износостойкость.

Методика исследования

Исследовались образцы одного химического состава (окись кремния 2...5,0 %, графит 2...5 %, медь 10,5...17,5 %, барит 2,0...5,2 %, железо остальное), но с разной микроструктурой, которая достигалась соответствующими режимами спекания и термической обработкой. Режимы спекания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы спекания

Образцы	Режимы спекания
1	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 2,5 ч. Выдержка при $T = 1150$ °С 1 ч.
2	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 3 ч. Выдержка при $T = 1150$ °С 1 ч.
3	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 3 ч. 10 мин. Выдержка при $T = 1155$ °С 1,5 ч.

Из компонентов порошковой смеси при спекании жидкую фазу может обеспечивать только медь с температурой плавления $T_{пл} = 1085$ °С, но ее количество недостаточно для обеспечения полноценного жидкофазного спекания. Можно ожидать, что формирование структуры при спекании происходит главным образом за счет образования металлических связей в твердофазной области.

Травление микрошлифов осуществлялось 4%-м раствором азотной кислоты в спирте. Цифровые изображения микроструктур получали на металлографическом микроскопе Nikon при 200-, 400- и 1000-кратном увеличении. Компьютерная обработка изображения проводилась с помощью специальной программы Image.Pro.Plub.5.1. В качестве показателя развитости границ использовалась средняя плотность периметра границ, вычисляемая по формуле [4]

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i}{F_i} \right),$$

где N – число микроструктурных объектов, зафиксированных на единичной площади металлографического шлифа; P_i и F_i – соответственно периметр и площадь каждого



микроструктурного объекта. В зависимости от кратности увеличения на одной фотографии микроструктуры располагалось 1500...4500 объектов. Такое количество объектов на изображении микроструктур гарантировало высокую статистическую точность компьютерной обработки по 2...3 фотографиям одного и того же образца.

Триботехнические испытания разрабатываемого фрикционного материала проводили на специальном стенде с электроприводом СП-6. Стенд включал фрикционную муфту, диски которой были покрыты новым разработанным фрикционным материалом. Фрикционные диски при передаче момента прижимались усилием, которое создавалось набором тарельчатых пружин с помощью нагрузочной гайки. Сжимающая нагрузка повышалась ступенчато с шагом не более 1000 Н.

Фрикционные испытания исследуемых материалов заключались в проворачивании фрикционных дисков в течение 10 с при заданной величине усилия их прижатия. В результате трения фрикционных дисков между собой крутящий момент на двигателе электропривода увеличивался, при этом по величине силы тока можно было косвенно оценить энергетические потери, связанные с работой трения. Одновременно замерялись колебания силы тока, по которой определялась динамическая стабильность трения фрикционных дисков между собой.

Итак, в результате проведенного эксперимента измеряли усилие прижима фрикционных дисков и колебание силы тока в течение 10 с проскальзывания дисков относительно друг друга. По полученным данным рассчитывался диапазон изменения силы тока, приращение и относительное изменение силы тока, отнесенные к единице усилия прижима фрикционных дисков при их проскальзывании. Полученные эксплуатационные характеристики работы фрикционных материалов сравнивались с количественными показателями их структурной организации для оптимизации состава и режимов спекания.

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 представлены микроструктуры исследуемых образцов. Они состоят из одних и тех же компонентов, но ощутимо разнятся по структурной организации, которая достигалась за счет разных режимов спекания. Режимы спекания исследуемых материалов отличались длительностью нагрева и продолжительностью выдержки при максимальной температуре процесса. Минимальному времени подвергались образцы группы 1, а максимальному – группы 3. Это отражается в первую очередь на размере и форме спеченных перлитно-цементитных частиц и других структурных составляющих.

Матрица исследуемых фрикционных материалов состоит из пластинчатого перлита и цементита, представляющая структуру заэвтектоидной стали. По границам зерен располагаются силикатные, графитовые и медные фазы. Некоторое количество цементита присутствует в виде глобулярных образований внутри спеченных зерен. Как правило, такие зерна имеют относительно крупные размеры и образуются путем спекания нескольких мелких частиц исходного порошка. Поры разных размеров и форм присутствуют на границах зерен и внутри них.

Компьютерный анализ изображений микроструктур, выполненный с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1, показал следующее.

Режимы спекания определяют размер и форму зерен и пор, и, как следствие, степень развитости границ раздела. Наибольшая степень развитости имеет место у образцов первой группы, средняя плотность границ которых составила $q = 1,065 \text{ мкм}^{-1}$. Образцы второй и третьей группы отличаются более низкой степенью развитости границ, равных соответственно 0,368 и 0,578 мкм^{-1} , при этом формирующаяся микроструктура отличается меньшими размерами пор и более гладкими границами. Такие поры обладают лучшей способностью образовывать объемные «карманы» микромасштабного уровня для смазки [5].

Наличие в микроструктуре медной фазы не влияет на теплопроводность материала, так как они не образуют каналы сплошной проводимости. Однако присутствие самой меди может создавать условия для развития микрогальванических пар, а они стимулируют образование аморфных сервовидных пленок, снижающих адгезионную компоненту коэффициента трения [6]. Более низкая зернистость микроструктуры образцов первой группы приводит к повышенным

микролокальным контактным напряжениям, и это может отрицательно сказываться на фрикционных процессах трения фрикционных дисков [7]. Подтверждением этому является увеличение диапазона изменения силы тока на электроприводе при проскальзывании фрикционных дисков.

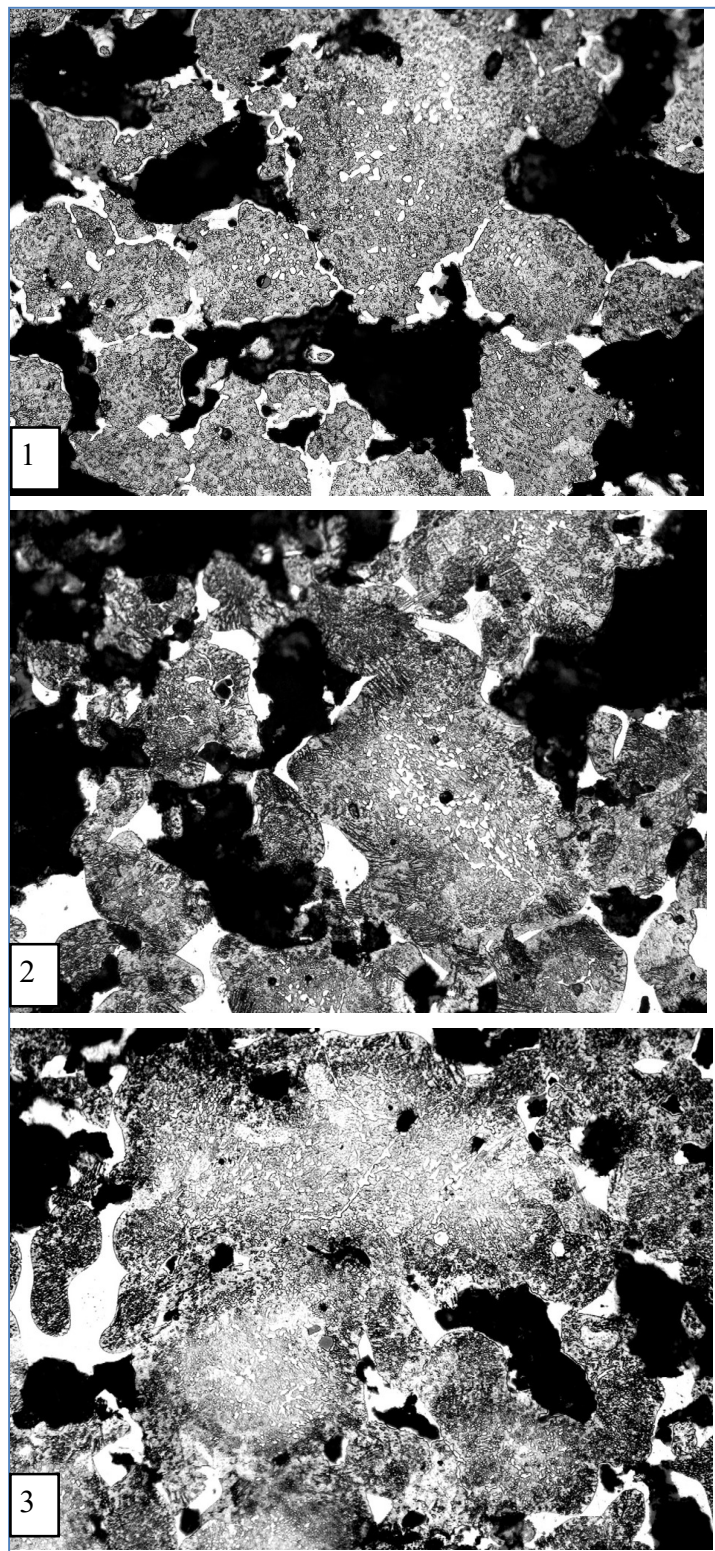


Рис. 1. Микроструктуры исследуемых фрикционных материалов первой, второй и третьей групп

Меньшие значения показателя плотности границ образцов второй и третьей групп указывает на их более низкую развитость. Чем больше показатель плотности границ, тем выше их устойчивость и ниже сдвиговая активность. В результате зернограницных сдвигов совершается большая часть работы внутреннего трения при контактном взаимодействии, которая определяет плотность мощности диссипативных потоков, возникающих при контактной пластической деформации фрикционных материалов. Исходя из этого, можем ожидать, что образцы второй и третьей группы должны обеспечивать более стабильные условия при проскальзывании фрикционных дисков и лучшую динамику работы фрикционных муфт.

Относительное изменение силы тока определялось как частное от деления абсолютного диапазона изменения силы тока и его среднего значения. Полученная величина характеризует динамику и стабильность фрикционного взаимодействия дисков при их проскальзывании. Чем выше диапазон изменения силы тока, тем ниже стабильность фрикционного процесса. На рис. 2 показан характер изменения диапазона колебания силы тока при различных усилиях прижатия фрикционных дисков. Образец первой группы имеет существенно худшие динамические условия трения по сравнению с образцами второй и третьей групп. С повышением усилия прижима диапазон колебания силы тока при работе образцов первой группы возрастает, а у образцов второй и третьей групп наблюдается стабилизация и незначительное снижение. Образцы групп 2 и 3 практически идентичны между собой, а их поведение во фрикционном процессе подтверждает, что они обладают более высокими диссипативными свойствами.

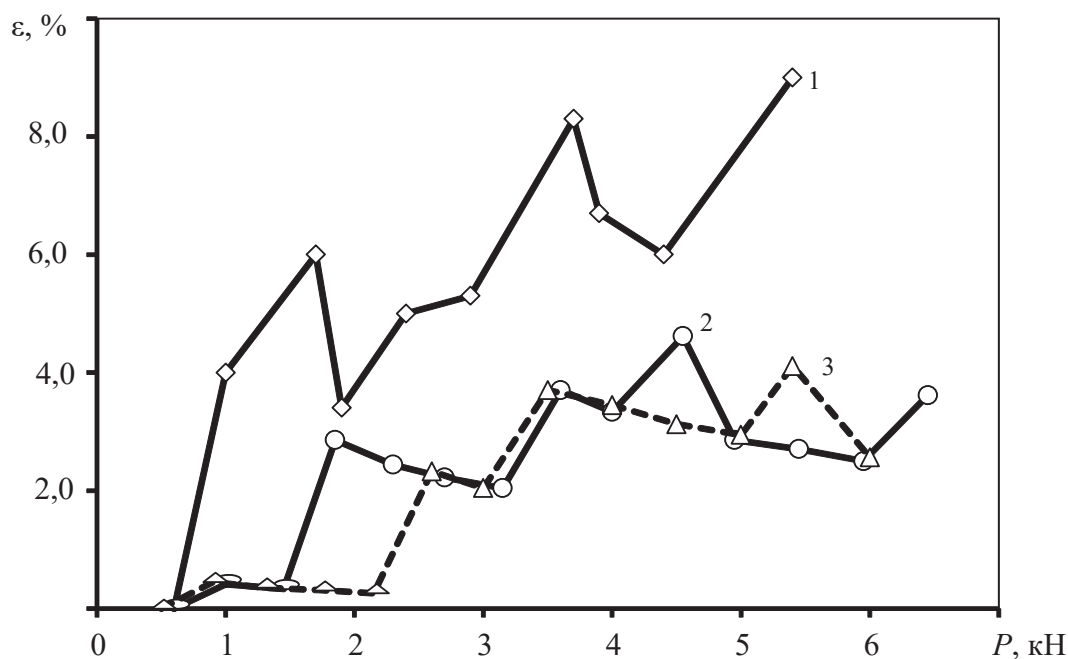


Рис. 2. Относительное изменение силы тока на электродвигателе привода в зависимости от усилия сжатия фрикционных дисков при проскальзывании

С повышением усилия прижима при проскальзывании фрикционных дисков между собой среднее значение силы тока возрастает. Полученные зависимости для исследуемых материалов представлены на рис. 3. Единая зависимость для трех исследуемых материалов указывает на общность механизмов контактного взаимодействия при трении фрикционных дисков между собой независимо от структуры материала, которые характеризуются постоянством коэффициента трения.

Выполненные исследования позволили уточнить микроструктуру фрикционного материала, обеспечивающего более стабильные условия работы фрикционных муфт. Был определен химический состав материала, режимы спекания и термической обработки. В качестве количественного показателя структурной организации фрикционного материала, характе-

ризирующего развитость границ и их диссипативные свойства, можно использовать среднюю плотность периметра границ.

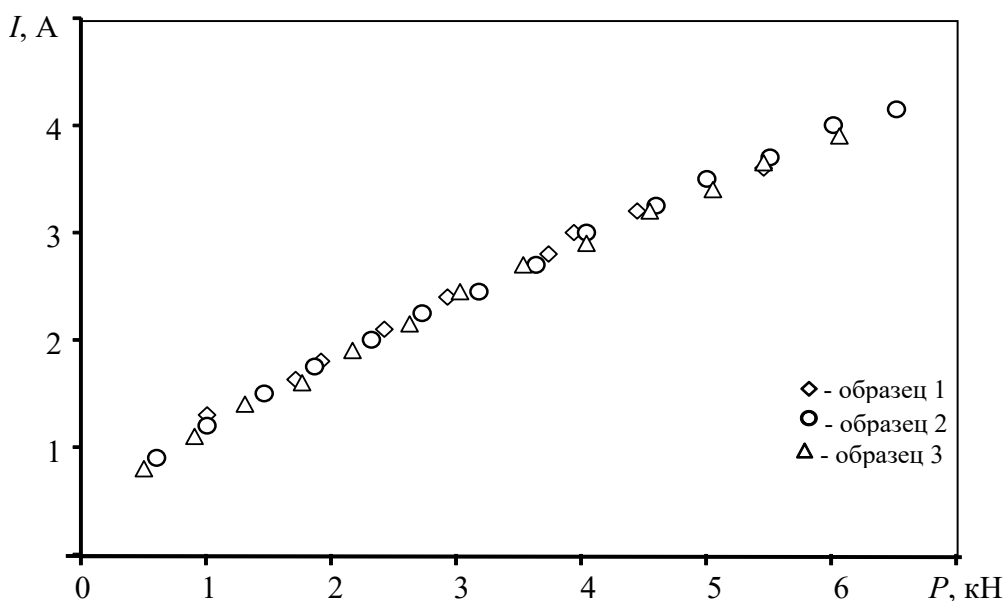


Рис. 3. Влияние усилия сжатия фрикционных дисков на силу тока электродвигателя привода перевода стрелки

Выводы

Стабильные условия работы фрикционных муфт в значительной степени определяются структурной организацией материала фрикционных дисков. Сформулированы структурно-диссипативные требования, обеспечивающие стабильность работы фрикционных дисков, и определены химический состав и режимы спекания фрикционного материала, получаемые методом порошковой металлургии. Показано, что в качестве количественного показателя структурной организации фрикционного материала можно использовать среднюю плотность границ, разработана методика его определения. Показано, что с повышением средней плотности границ снижается диссипативная способность фрикционного материала, понижается динамическая стабильность фрикционного процесса при трении дисков между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.
2. Ким, В. А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии, и изнашивании / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1(18). – С. 79-85.
3. Ким, В. А. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2017. – 200 с.
4. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золоторева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 4. – С. 43-46.
5. ГОСТ 18898-89. Методы определения плотности, содержания масла и пористости. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 10 с.
6. Гаркунов, Д. Н. Трибоника / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
7. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – Введ. 1957-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 12 с.