



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

6
2021

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции:

**107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 661-38-80.**

**E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru
www.mashin.ru**

Журнал зарегистрирован 27 марта 2020 г. за ПИ № ФС 77-78172 в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)
Учредитель: Е.А. Боголюбова

Индекс: **27841** ("Пресса России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: www.aov.ru

Главный редактор А.С. БОГОЛЮБОВ

**Заместитель главного редактора
Е.А. БОГОЛЮБОВА**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, Братухин А.Г., д-р техн. наук, Воронцов А.Л., д-р техн. наук, Гусейнов А.Г., д-р техн. наук, Дмитриев А.М., д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Драгунов Ю.Г., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Древаль А.Е., д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), Кабалдин Ю.Г., д-р техн. наук, Кутин А.А., д-р техн. наук, Омельченко И.Н., д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), Кузин В.В., д-р техн. наук, Попов Д.Н., д-р техн. наук, Попов А.В., д-р техн. наук, Рыбин В.В., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Трегубов Г.П., д-р техн. наук, Сычев А.П., канд. физ.-мат. наук, Скугаревская Н.В. (ответственный секретарь)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

- Лазарев С. И., Абоносимов О. А., Селиванов Ю. Т., Лазарев Д. С., Котенев С. И., Левин А. А. — Разработка конструкции и методика расчета на прочность электробаромембранного аппарата рулонного типа 3
- Богданов В. И. — Концепция бустерного двигателя с функцией вспомогательной силовой установки для перспективного пассажирского самолета 8
- Кочетков А. В., Салов П. М., Игнат'ев А. А., Добряков В. А., Захаров О. В. — Компьютерная поддержка формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом 11
- Рызванович А. Я., Генералов В. А. — Новые технические решения в конструкции импульсного вариатора, расширяющие области использования импульсного движения 15
- Гордеев Б. А., Ерофеев В. И., Охулков С. Н., Плехов А. С., Ванягин А. В. — Условия применимости линейных моделей, описывающих распространение акустических волн 18
- Космынин А. В., Щетинин В. С., Смирнов А. В., Хвостиков А. С., Мар'ин Б. Н., Кузнецов С. А. — Шпиндельный узел с регулируемыми выходными характеристиками 21
- Дос'ко С. И., Утенков В. М., Молчанов А. А. — Спектральный анализ в исследовании и диагностике станков 23
- Лялякин В. П., Слинко Д. Б. — Ускоренный метод Локати для испытания деталей машин на сопротивление усталости 28
- Захаров М. Н., Любченко М. А., Магнитский И. В. — Несущая способность резьбовой пары из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов при высоких температурах 30
- Блохин М. А., Грачева Э. Ю., Павлова И. И. — Особенности проектирования многоопильного блока в виде коленчатой пилы 35
- Фаткиева Р. Р., Шичкина Ю. А. — Метод реконфигурации промышленных объектов с применением аппарата кусочно-линейных агрегатов 40

- Lazarev S. I., Abonosimov O. A., Selivanov Yu. T., Lazarev D. S., Kotenev S. I., Levin A. A. — Development of the design and method of calculating the strength of the roll-type electric baromembrane apparatus 3
- Bogdanov V. I. — The concept of a booster engine with the function of an auxiliary power unit for a prospective passenger aircraft 8
- Kochetkov A. V., Salov P. M., Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Zakharov O. V. — Computer support for the shape formation of helical surfaces with a disk tool 11
- Ryzvanovich A. Ya., Generalov V. A. — New technical solutions in the design of a pulsed variator, providing new areas for using pulsed motion 15
- Gordeev B. A., Erofeev V. I., Okhulkov S. N., Plekhov A. S., Vanyagin A. V. — Conditions of applicability of linear models describing the propagation of acoustic waves 18
- Kosmyinin A. V., Schetinin V. S., Smirnov A. V., Khvostikov A. S., Mar'in B. N., Kuznetsov S. A. — Spindle assembly with adjustable output characteristics 21
- Dos'ko S. I., Utenkov V. M., Molchanov A. A. — Spectral analysis in research and diagnostics of machine tools 23
- Lyalyakin V. P., Slinko D. B. — Accelerated Locati method for testing machine parts for fatigue resistance 28
- Zakharov M. N., Lyubchenko M. A., Magnitskiy I. V. — Bearing capacity of a threaded pair made of spatially reinforced carbon-carbon composite materials at high temperatures 30
- Blokhin M. A., Grocheva E. Yu., Pavlova I. I. — Peculiarities of designing a multi-saw block in the form of a crank saw 35
- Fatkjeva R. R., Shichkina Yu. A. — Method of reconfiguring industrial facilities using the apparatus of piecewise linear aggregates 40

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

MANUFACTURING ENGINEERING

- Климов А. С., Кудинов А. К., Климов В. С. — Влияние параметров сети на точность управления и диагностики контактной сварки 46
- Воронцов А. Л. — Исследование штамповки неравнополочных швеллеров. Часть 4. Деформированное состояние заготовки при выдавливании швеллеров. 2. Деформации под торцом пуансона 53
- Серенков П. С., Рудницкий Ф. И., Воронова Т. С., Чаус А. С. — Экспертные методы разработки инновационных технологий для производства литого инструмента. Часть 1. Формирование комплекса функциональных показателей технологии 57
- Каблов Е. Н., Антипов В. В., Серебренникова Н. Ю., Сидельников В. В., Нefeldова Ю. Н., Огурцов П. С., Соловьев В. А. — Технологические особенности автоклавного формования деталей сложной конфигурации из листов сплава В9504 62
- Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С. — Синтез новых металлических материалов, включая полученных методами 3D-печати, на основе подходов нелинейной динамики и искусственного интеллекта 67
- Расулов Н. М., Алекберов М. З., Надилов У. М. — Повышение эффективности шлифования фасонных поверхностей с копированием 71

- Klimov A. S., Kudinov A. K., Klimov V. S. — Influence of network parameters on the accuracy of control and diagnostics of resistance welding 46
- Vorontsov A. L. — Research of stamping of unequal channel bars. Part 4. Deformed state of the workpiece when extruding channels. 2. Deformations under the punch end 53
- Serenkov P. S., Rudnitskiy F. I., Voronova T. S., Chaus A. S. — Expert methods of developing of innovative technologies for the production of cast tools. Part 1. Formation of a complex of functional indicators of technology 57
- Kablov E. N., Antipov V. V., Serebrennikova N. Yu., Sidel'nikov V. V., Nefedova Yu. N., Ogurtsov P. S., Solov'ev V. A. — Technological features of autoclave molding of parts of complex configuration from B9504 alloy sheets 62
- Kabaldin Yu. G., Shatagin D. A., Anosov M. S. — The synthesis of new metal materials, including the ones that are obtained by 3D-printing methods, based on nonlinear dynamics and artificial intelligence approaches 67
- Rasulov N. M., Alekberov M. Z., Nadirov U. M. — Increasing the effectiveness of grinding of shaped surfaces with copying 71

Теория и практика резания материалов

Problems of theory and practice of materials cutting

- ТабакOV В. П., Сизов С. В. — Импульсная лазерная обработка твердосплавного режущего инструмента с многослойным покрытием 74
- Селеменов М. Ф., Кравченко И. Н., Кузнецов Ю. А., Величко С. А., Ерофеев М. Н., Боровик Т. Н., Просолов Е. А., Селеменова Е. М. — Моделирование низкоскоростной механической обработки материалов с использованием систем DEFORM-3D и SolidWorks 79

- Tabakov V. P., Sizov S. V. — Pulse laser processing of hard-alloy cutting tool with multilayer coating 74
- Selemenov M. F., Kravchenko I. N., Kuznetsov Yu. A., Velichko S. A., Erofeev M. N., Borovik T. N., Prosolov E. A., Selemenova E. M. — Modeling of low-speed mechanical processing of materials using DEFORM-3D and SolidWorks systems 79

Обработка материалов без снятия стружки

Chipless processing of materials

- Дронов А. И., Паршин В. С., Семенова Н. В. — Оценка эффективности инноваций работы волоочильных станков 82

- Dronov A. I., Parshin V. S., Semenova N. V. — Evaluation of the effectiveness of innovations in the work of drawing mills 82

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

TECHNICAL INFORMATION

- Оборин С. В., Губина Т. Ю. — Контейнеры из композиционных материалов для транспортирования и хранения авиационных двигателей 86

- Oborin S. V., Gubina T. Yu. — Containers made of composite materials for transportation and storage of aircraft engines 86

Технический редактор Т. А. Шацкая
Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 28.03.2021. Подписано в печать 18.05.2021.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 66.081.63

DOI: 10.36652/0042-4633-2021-6-3-8

С. И. ЛАЗАРЕВ, О. А. АБОНОСИМОВ, Ю. Т. СЕЛИВАНОВ, д-ра техн. наук, Д. С. ЛАЗАРЕВ, С. И. КОТЕНЕВ, А. А. ЛЕВИН (Тамбовский государственный технический университет), e-mail: mig@tstu.ru

Разработка конструкции и методика расчета на прочность электробаромембранного аппарата рулонного типа¹

Разработана конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа. Высокое качество разделения растворов достигнуто совмещением электробаромембранного разделения с охлаждением электродов с помощью коллекторов для протекания охлаждающей воды при независимом расположении дренажных каналов прикатодного и прианодного пермеата. Предложена методика расчета на прочность корпуса электробаромембранного аппарата с определением необходимой толщины стенки корпуса и фланцев из стеклопластика.

Ключевые слова: электробаромембранный аппарат, разделение, мембрана, расчет на прочность.

The design of the roll-type electric baromembrane apparatus is developed. High quality separation of solutions is achieved by combining electric baromembrane separation with electrode cooling using collectors for the flow of cooling water with an independent arrangement of drainage channels of the near-cathode and near-anode permeate. A method is proposed for calculating the strength of the body of an electric baromembrane apparatus with the determination of the required thickness of the body wall and fiberglass flanges.

Keywords: electric baromembrane apparatus, separation, membrane, strength calculation.

На химических, машиностроительных и металлургических предприятиях образуются технологические растворы, которые по составу относят к наиболее токсичным производственным стокам. Технологический процесс на большинстве предприятий предусматривает смешение слабозагрязненных и концентрированных технологических вод для последующей их совместной очистки. Более 70 % технологических вод подобных предприятий сбрасывается загрязненными с превышениями

норм предельно допустимых концентраций (ПДК). Современные требования к сбросу промышленных сточных вод обуславливают поиск и разработку более эффективных решений в области очистки вод [1, 2].

Наиболее рациональный путь для решения этой насущной проблемы — разработка технологических систем разделения технологических вод с применением возможности регенерации ценных компонентов и возврата очищенных вод в систему водоснабжения производства [3].

Анализируя существующие методы разделения технологических вод, можно отметить, что наибольший успех достигается при применении методов мембранного разделения, в частности обратного осмоса, ультрафильтрации и электробаромембранных процессов [4–6]. Электробаромембранный метод очистки позволяет возвращать в оборотный цикл пермеат в количестве 99 % от объема технологических вод, а на стадии извлечения ценных компонентов возвращать ретентат в количестве 1 % от объема очищенных вод.

Обладающие перспективами электробаромембранные процессы разделения стоков и промышленных растворов пока не получили достаточно широкого распространения в промышленности. Две основные причины этого — отсутствие технологического оформления процессов очистки и несовершенство существующей электромембранной техники.

Цель данной работы — разработка оригинальной конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа, с помощью которого можно осуществить разделение смешанных технологических растворов и сточных вод, в которых одновременно содержатся и органические, и неорганические вещества [7–10].

Конструкция разработанного электробаромембранного аппарата рулонного типа представлена на рис. 1 [11].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90117).

Аппарат работает следующим образом. Исходный раствор под давлением, превышающим осмотическое, подается через перфорированную трубку 2, разделенную на две одинаковые секции вертикальной перегородкой 21, в межмембранный канал с сеткой-турбулизатором 9, который образован последовательно уложенными с двух сторон от сетки-турбулизатора 9 прикатодной и прианодной

мембранами 4 и 28, подложками мембран 5, дренажными сетками катода 7 и анода 26 и непористой пленкой 6.

Параллельно с этим включением устройства 14 для подвода электрического тока к дренажным сеткам подводится внешнее постоянное электрическое поле с помощью электрических проводов 11, проходящих через отверстие 19 в полимерной пер-

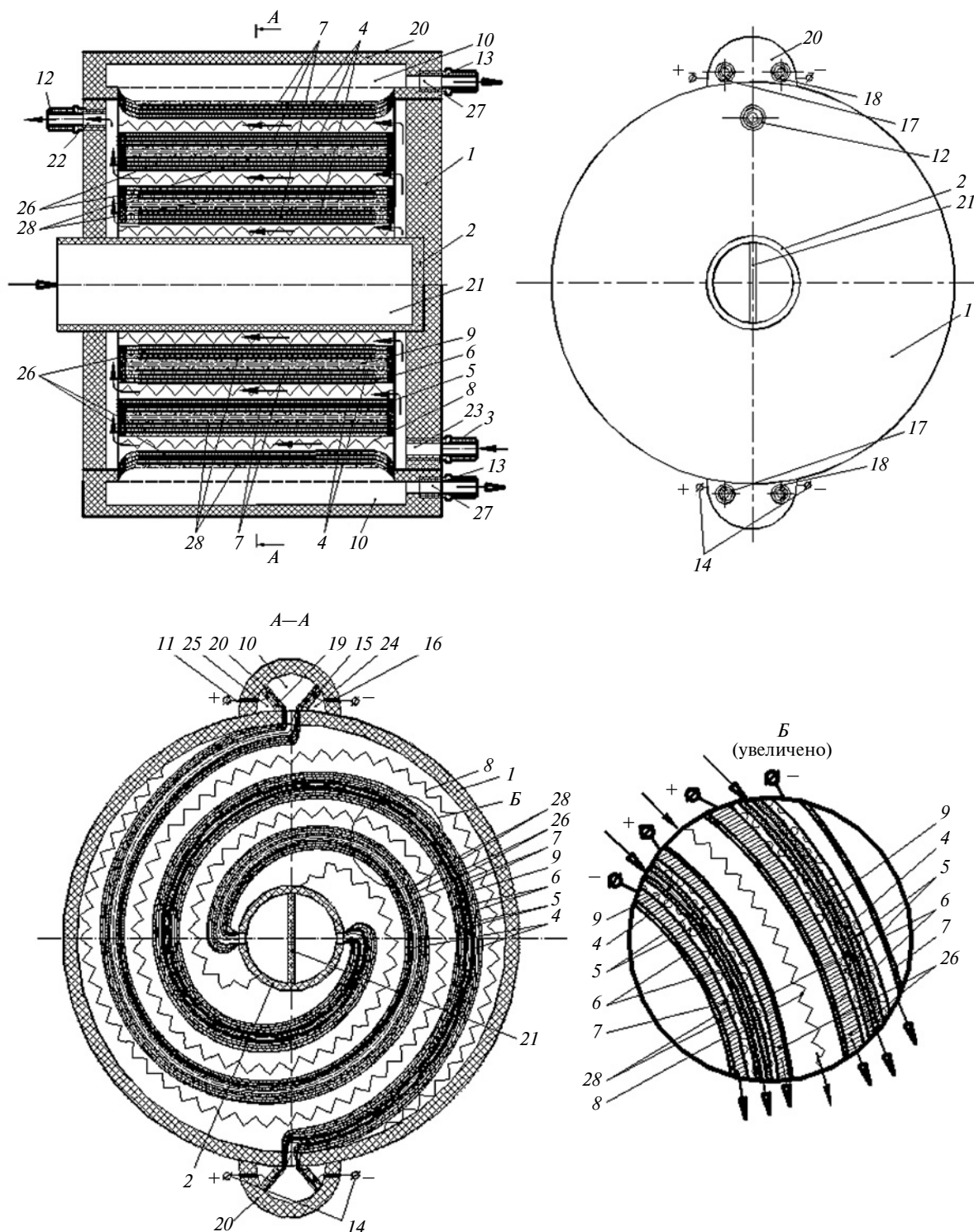


Рис. 1. Поперечное сечение электробаромембранного аппарата рулонного типа

форированной перегородке 15. Перегородка перфорирована в три ряда в шахматном порядке по всей длине. В отверстиях, имеющих в полуцилиндрах корпуса аппарата, находится герметизирующая заливка 16.

Протекающий раствор турбулизируется с помощью сетки-турбулизатора 9 и движется к прикатодным и прианодным мембранам 4 и 28 (в зависимости от схемы подключения электрического тока).

В процессе разделения анионы и катионы, двигаясь в межмембранном канале, проникают через прианодную и прикатодную мембраны 28 и 4, подложки 5 и поступают в дренажные каналы прианодного и прикатодного пермеатов (образуются в пространстве между подложками 5 и непористыми пленками 6).

После этого потоки пермеатов движутся по коллекторам отвода пермеатов 24 (прикатодного) и 25 (прианодного) (образованы в пространстве между полуцилиндром 20 корпуса аппарата, корпусом 1 и полимерной перфорированной перегородкой 15). Данная перегородка перфорирована по всей длине отверстиями 19 в три ряда в шахматном порядке и расположена под углами $\pi/4$ и $-\pi/4$ и $3\pi/4$ и $-3\pi/4$ к горизонтальной оси аппарата в месте крепления непористых пленок 6 к корпусу 1. Из коллекторов пермеат отводится через штуцеры 18 и 17 для отвода прикатодного и прианодного пермеата.

Параллельно с подачей исходного раствора происходит подвод охлаждающей воды через отверстия 22 и 23 и штуцеры ввода охлаждающей воды 3 и 12, которые находятся под углами $\pi/2$ и $-\pi/2$ от горизонтальной плоскости на расстоянии 0,06 м от края корпуса 1 на торцевых поверхностях. После происходит заполнение коллектора для протекания охлаждающей воды с сеткой-турбулизатором 8. Коллектор образован пространством между корпусом 1, непористой пленкой 6 и перфорированной трубкой 2.

В процессе разделения исходный раствор протекает по межмембранному каналу и очищается от катионов и анионов. Последние отводятся через коллекторы 10. Данные коллекторы образованы пространством между полимерными перфорированными перегородками 15 с перфорацией по всей длине в три ряда отверстиями 19 в шахматном порядке. К внутренней части полуцилиндра 20 приклеены последовательно уложенные дренажные сетки (катод 7 и анод 26), подложки 5, прикатодные и прианодные мембраны 4 и 28.

Ретентат выводится через отверстия 27 со штуцерами 13 для отвода ретентата, которые расположены на торцевой поверхности полуцилиндра 20 под углами $\pi/4$, $3\pi/4$ и $-\pi/4$, $-3\pi/4$ от горизонтальной оси в месте крепления непористых пленок 6 к корпусу 1.

В данном случае под повышением качества и эффективности разделения растворов и улучшении-

ем охлаждения электродов катода 7 и анода 26 подразумевается возможность совместить электробаромембранное разделение с процессом охлаждения электродов (дренажных сеток). Для этого в аппарате присутствует коллектор для протекания охлаждающей воды при независимом расположении друг относительно друга дренажных каналов прикатодного и прианодного пермеата. Данные каналы соединены с коллекторами отвода прикатодного и прианодного пермеата 24 и 25 с помощью отверстий 19 в перфорированных в три ряда по всей длине в шахматном порядке перегородках 15.

Дренажные сетки (катод 7 и анод 26) являются монополярными электродами из графитовой ткани (катодом или анодом в зависимости от схемы подключения электрического тока). Необходимость их охлаждения заключается в том, что исходный раствор прокачивается над поверхностью мембран 4 и 28 и затем проходит через них в виде прикатодного и прианодного пермеата с температурой от 293 до 313 К. Далее он самотеком проходит как раз через дренажные каналы (образованы пространством между непористыми пленками 6 и подложками 5) и охлаждается через теплопередающую стенку, которой является непористая пленка 6, с помощью охлаждающей воды с температурой от 278 до 288 К.

Расположенные по всей длине полуцилиндров корпуса аппарата в середине перегородки препятствуют протеканию прикатодного и прианодного пермеата из коллекторов отвода прикатодного пермеата 24 и прианодного пермеата 25, минуя штуцеры 18 и 17 для отвода прикатодного и прианодного пермеата.

При выборе основных геометрических параметров корпуса и днищ электробаромембранного аппарата необходимо оценить прочность конструкции аппарата при регулярном нагружении трансмембранным давлением подаваемого в обечайку корпуса разделяемого раствора.

Обечайку корпуса электробаромембранного аппарата (см. рис. 1) следует рассматривать как тонкостенную осесимметричную оболочку, имеющую форму тела вращения, т. е. полярно симметричную относительно некоторой оси. Задача о расчете оболочек вращения наиболее просто решается в том случае, когда возможно принять, что напряжения, возникающие в оболочке, постоянны по толщине и, следовательно, изгиб оболочки отсутствует. Теория оболочек, построенная на этом предположении, называется безмоментной теорией оболочек. На рис. 2 представлена расчетная схема оболочки вращения.

Из оболочки, изображенной на рис. 2, а, выделим две меридиональные плоскости m_1n_2 и m_3n_2 (т. е. плоскости, проходящие через ось симметрии оболочки) с углом $d\varphi$ между ними и двумя плос-

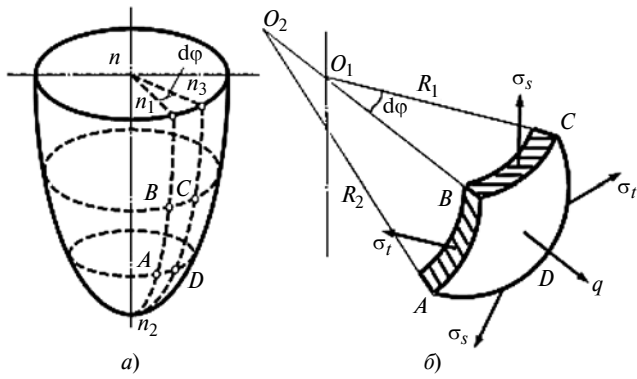


Рис. 2. Расчетная схема оболочки вращения

костями BC и AD , перпендикулярными оси симметрии оболочки, выделим элемент $ABCD$.

Радиусы кривизны O_2A и O_2B элемента $ABCD$ в меридиональной плоскости обозначим через R_2 , а радиусы O_1B и O_1C в плоскости, перпендикулярной меридиану, — через R_1 . Нормальные напряжения, действующие по боковым граням AB и CD , соприкасающимся с меридиональными плоскостями, называются окружными напряжениями σ_t . Нормальные напряжения, действующие по боковым граням BC и AD , называются меридиональными напряжениями σ_s . Кроме напряжений σ_s и σ_t на элемент оболочки действует нагрузка в виде давления q , перпендикулярного поверхности $ABCD$.

Основным уравнением безмоментной теории оболочек является уравнение Лапласа, которое имеет вид:

$$\frac{\sigma_t}{R_1} + \frac{\sigma_s}{R_2} = \frac{p}{s}, \quad (1)$$

где p — внутреннее избыточное давление, МПа; s — толщина стенки обечайки.

Уравнение равновесия для цилиндрической оболочки, находящейся под воздействием внутреннего давления, может быть получено как сумма проекций всех сил на горизонтальную ось:

$$\sigma_s 2\pi R_1 s - p\pi R_1^2 = 0.$$

В этом уравнении одна неизвестная величина σ_s .

Для случая цилиндрической оболочки при подстановке в уравнение Лапласа необходимо учесть, что величина $R_2 = \infty$, значит $\sigma_s/R_2 = 0$.

Используя формулу Лапласа (1), имеем:

$$\sigma_t/R_1 = p/s.$$

Инженерная методика расчета гладкой обечайки корпуса и ее фланцевых соединений изложена в стандарте [12].

Гладкие обечайки без колец жесткости под внутренним давлением рассчитывают в приведенной ниже последовательности.

Вначале определяют расчетную толщину стенки обечайки по зависимости

$$S_p = \frac{PD}{2[\sigma] - p},$$

где p — внутреннее избыточное давление, МПа; D — внутренний диаметр аппарата, мм; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, МПа.

Необходимо учитывать, что стеклопластик имеет прочностные характеристики во многом более высокие, чем сталь. Так, согласно работе [13] предел прочности (для металлов предел текучести) стали составляет 240 МПа, алюминия — 50–440 МПа, стеклопластика — 800–1700 МПа. Однако в последнем случае необходимо учитывать, что является связующим веществом — полиэфирные смолы, феноло-формальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические смолы, полиамиды, алифатические полиамиды, поликарбонаты и др. Выбор связующего вещества оказывает существенное влияние на предел прочности стеклопластика.

Далее проверяют условие прочности стенки обечайки:

$$S \geq S_p + C,$$

где S_p — расчетная толщина стенки обечайки; C — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм.

Допускаемое избыточное внутреннее давление составляет:

$$[p] = \frac{2[\sigma](S - C)}{D + (S - C)}.$$

Расчет плоских днищ с отверстиями, нагруженных внутренним давлением, проводят в следующем порядке.

Рассчитывают толщину стенки днища по зависимости:

$$S_{1p} = KK_0 D \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}}. \quad (2)$$

Условие получения необходимой прочности стенки днища имеет вид:

$$S_1 \geq S_{1p} + C. \quad (3)$$

Значение коэффициента K в формуле (2) определяется в зависимости от конструкции днища. Для указанного на рис. 1 варианта крепления днища к обечайке

$$\text{при } \frac{S - C}{S_1 - C} \leq 0,25 \text{ имеем } K = 0,45;$$

$$\text{при } \frac{S - C}{S_1 - C} \geq 0,25 \text{ имеем } K = 0,41.$$

Во всех случаях толщина днища должна быть больше или равна толщине обечайки.

Коэффициент K_0 ослабления для днищ, имеющих несколько отверстий, определяют по формуле

$$K_0 = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sum d_i}{D}\right)^3}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sum d_j}{D}\right)^3}},$$

где d_i — диаметры отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении днища корпуса.

В рассматриваемом случае в левом днище корпуса имеется два отверстия разного диаметра, в правом днище — три одинаковых по размеру отверстия.

Если неравенство $\frac{S_1 - C}{D} \geq 0,11$ не выполняется, вводится поправочный коэффициент

$$K_p = \frac{2,2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \frac{S_1 - C}{D}\right)^2}}.$$

В дальнейшем рассчитанная величина допускаемого избыточного давления умножается на этот коэффициент.

Допускаемое давление на днище корпуса определяется по формуле

$$[p] = \left(\frac{S_1 - C}{KK_0 D}\right)^2 [\sigma].$$

Причем расчет следует проводить для левого и правого днища отдельно.

В табл. 1 приведены физико-механические характеристики композиционного материала, изготовленного ООО "Эволюшн Моторс". Испытания проводились лабораторией неметаллических материалов ОАО "НПП "Звезда".

Значения в табл. 1 получены при разрушении материала, поэтому для корректного сравнения необходимо учитывать коэффициент запаса прочности. Если этот коэффициент равен 2 (нагрузки, возникающие в материале в 2 раза меньше, чем максимально возможные), то прочность и напряжения при изгибе необходимо уменьшить в 2 раза

Таблица 1

Показатель	Значение показателя	Стандарт на метод измерения
Плотность материала, г/см ³	1,72	ГОСТ 15139—69
Прочность при разрыве, МПа	277	ГОСТ 11262—80
Модуль упругости при растяжении, МПа	$5,1 \cdot 10^3$	ГОСТ 9550—81
Разрушающее изгибающее напряжение, МПа	155	ГОСТ 4648—71
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	172	ГОСТ 4647—80

Таблица 2

Показатель	Материал				
	Ст.3	Сталь 45	Д16	АМг6	Композит
Плотность материала, г/см ³	7,8	7,8	2,8	2,6	1,72
Допускаемое напряжение при растяжении, МПа	125	200	270	147	138,5
Модуль нормальной упругости, 10 ³ МПа	210	200	6,8	6,9	5,1
Допускаемое напряжение при изгибе, МПа	140	240	270	147	77,5
Ударная вязкость, кДж/м ²	784	882	230	392	172

Таблица 3

Давление, МПа	Толщина стенки обечайки, мм	Толщина левой крышки, мм	Толщина правой крышки, мм
2	0,73	4,65	4,31
4	1,45	6,58	6,09
6	2,21	8,06	7,47
8	2,97	9,30	8,62
10	3,74	10,40	9,64

и полученные значения сравнивать со значениями в табл. 2. Таким образом, можно составить сравнительную таблицу.

Расчет толщин обечайки, левой и правой крышек с отверстием для среднего значения допускаемого напряжения стеклопластика $[\sigma] = 138,5$ МПа представлен в табл. 3.

Во всех случаях к этим величинам добавляется величина C — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок (СТП 10-04—02 не нормирует эту величину).

Приведенная методика и выполненные примеры расчета корпуса и фланцев позволяют оценить напряженно-деформированное состояние конструкции электробаромембранного аппарата на прочность при регулярном нагружении его трансмембранным давлением и определять необходимые размеры стенок и днищ корпуса в процессе разработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Gogina E., Makisha N.** Information technologies in view of complex solution of waste water problems // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 587—589. P. 636—639.
2. **Колесников В. А., Ильин В. И., Кучеров А. А.** Очистка сточных вод на металлургических предприятиях // Экология производства. 2010. № 3. С. 31—36.
3. **Paidar M., Fateev V., Bouzek K.** Membrane electrolysis — History, current status and perspective // Electrochim. Acta. 2016. V. 209. P. 737—756.

В. И. БОГДАНОВ, д-р техн. наук (ПАО "ОДК-Сатурн", г. Рыбинск),
e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru

Концепция бустерного двигателя с функцией вспомогательной силовой установки для перспективного пассажирского самолета

Рассматривается концепция бустерного двигателя с функцией вспомогательной силовой установки для пассажирского самолета пятого поколения на основании научного задела по газотопливным двигателям. Конструкторские решения направлены на улучшение массогабаритных показателей летательного аппарата.

Ключевые слова: бустерный двигатель, вспомогательная силовая установка, подъемный двигатель, выходное устройство.

The concept of a booster engine with the function of an auxiliary power unit for a fifth-generation passenger aircraft is considered on the basis of scientific groundwork for gas-fuel engines. The design solutions are aimed at improving the weight and dimensions of the aircraft.

Keywords: booster engine, auxiliary power unit, lifting motor, output device.

Для концепций перспективных силовых установок (СУ) пассажирских самолетов характерны следующие особенности:

1. Сокращение числа двигателей, что позволяет снизить стоимость силовой установки. Даже для магистральных самолетов (Boeing 777) число двигателей сократилось до двух. Это требует

качественного повышения их надежности.

2. Значительное повышение электрической мощности различных приводов (в основном за счет сокращения гидромеханических и пневматических систем). Ведутся исследования по созданию электрического привода колес для руления с выключенными ос-

новными двигателями. При этом повышаются мощности электрогенераторов и емкость аккумуляторных батарей. Рассматривается вспомогательная силовая установка (ВСУ) с электрическим питанием от топливных элементов. Появились следующие названия технологий: "Полностью электрический самолет", "Более электрический самолет", которые отражают их суть [1, 2].

3. Противоречие между уменьшением потребной тяги в горизонтальном полете вследствие совершенствования аэродинамики планера самолета и целесообразным повышением взлетной тяги (увеличением тяговооруженности). Необходима оптимизация силовой установки.

В итоге требуется решение задач по повышению надежности СУ и увеличению ее взлетной тяги, а также задачи качественного повышения электрической мощности. В свое время для увеличения взлетной тяги на пассажирском самолете "Trident 3B" был установлен дополнительный бустерный (вспомогательный) турбореактивный двигатель (ТРД) RB.162-86 с тягой 23,3 кН и низкой удельной массой, который



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 3)

4. Aliano A., Cicero G. AC Electroosmosis: Basics and lab-on-a-chip applications // Encyclopedia of Nanotechnology. 2012. P. 25–30.

5. Дубяга В. П., Бесфамильный И. Б. Нанотехнологии и мембраны // Крит. технологии. Мембраны. 2005. № 3. С. 11–16.

6. Flat-chamber electrobaromembrane apparatus with improver characteristics and its calculation method / S. I. Lazarev, S. V. Kovalev, O. A. Kovaleva et al. // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 53. No. 1–2. P. 114–121.

7. Модель расчета массопереноса в электробаромембранных аппаратах рулонного типа / С. И. Лазарев, О. А. Абоносимов, М. А. Рябинский, А. С. Горбачев // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. Вып. 5. С. 109–111.

8. Kovaleva O. A., Lazarev S. I., Kovalev S. V. Development and calculation of an electrobaromembrane apparatus for purifying process solutions // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V. 53. I. 1. P. 21–25.

9. Разработка конструкции и расчет эффективной площади мембран и общего объема разделяемого раствора в электробаромембранном аппарате рулонного типа / С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, О. А. Ковалева, Д. Н. Коновалов // Вестник машиностроения. 2019. № 12. С. 21–24.

10. Расчет конструкции электробаромембранного плоскокамерного аппарата и объема разделяемого раствора / С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, О. А. Ковалева и др. // Вестник машиностроения. 2020. № 2. С. 34–41.

11. Пат. RU 248746: МПК B01D61/42. Электробаромембранный аппарат рулонного типа.

12. СТП 10-04-02. Расчет на прочность сосудов и аппаратов. Т. 1. Расчет на прочность вертикальных и горизонтальных аппаратов. М.: ООО НТП "Трубопровод", 2005. 190 с.

13. Сравнительная характеристика свойств стеклопластика, стали и алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]: Режим доступа: polisfera.pulscen.ru.

позволил сократить взлетную дистанцию на 550 м и одновременно увеличить полезную нагрузку примерно на 6500 кг [3]. А в РФ на базе подъемных двигателей РД36-35 и РД-38 для самолета короткого взлета и вертикальной посадки (СКВВП) разработки ПАО "ОДК-Сатурн" (г. Рыбинск) создавались бустерные двигатели: РД36-35Т (для самолета Ту-22), РД-38А (для самолета АН-71), РД-38К (для самолета-амфибии А-40) [4]. Удельная масса подъемных двигателей была на уровне 0,1 кг/даН. Перспективным развитием этих двигателей стал подъемный ТРД РД-48 для самолета ЯК-141 (в самолете устанавливались два подъемных двигателя). Однако технический уровень двигателей не обеспечил достаточную эффективность и они не получили широкого распространения.

В настоящее время созданный научно-технический задел по сокращению числа ступеней лопаточных машин за счет повышения удельной нагрузки на ступень и существенного увеличения температуры газа перед турбиной [5] позволяет создать турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД) (как альтернативу двум РД-48), имеющий тягу 80 кН и лучшую экономичность при сохранении длины двигателя на базе новых конструктивных решений. Для реализации такого двигателя была предложена следующая концепция.

Схема двигателя — одновальный двухконтурный ТРДД (степень двухконтурности $m = 1 \div 1,2$) с одноступенчатой высокоперепадной низкореперативной турбиной (степень понижения давления в турбине $\pi_T^* = 3,6 \div 4$, степень реактивности $\rho_T = 0,3$); температура газа перед турбиной $T_T^* = 1700 \div 1800$ К [5, 6]. Низкая степень реактивности обеспечивает здесь дополнительное снижение температуры газа перед рабочим колесом высокоперепадной турбины примерно на 120 К.

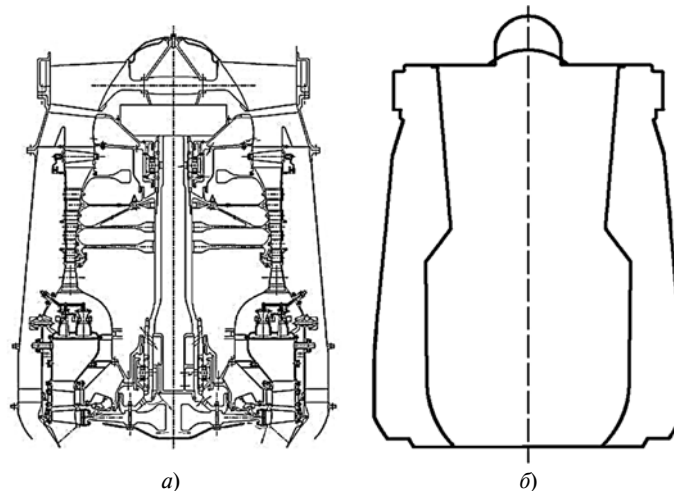


Рис. 1. Конструктивная схема ТРДД (а) и сравнение его габаритов с габаритами РД-48 (б)

Конструктивный облик, параметры компрессора, камеры сгорания и турбины определены из условия обеспечения ограниченной длины двигателя (как у РД-48) и использования научно-технического задела, соответствующего уровню авиационных газотопливных двигателей (ГТД) пятого поколения [5] и наработок ПАО "ОДК-Сатурн".

Выходное устройство внутреннего контура конструктивно формируется задними частями полок рабочих лопаток турбины и разделительной обечайкой, т. е. почти не увеличивает габаритную длину двигателя. Возможность совмещения сопла двигателя с выходом рабочего колеса турбины подтверждена расчетным исследованием в 3D-постановке [5].

Конструктивная схема предлагаемого двигателя и сравнение его по габаритным размерам с РД-48 приведены на рис. 1, а и б.

В процессе исследования были выполнены газодинамические и прочностные расчеты данной схемы двигателя и проведена предварительная оценка удельной массы двигателя [5]. В таблице приведены основные расчетные данные рассматриваемого двигателя и данные существующего РД-48.

Сравнение и анализ полученных данных показывают, что на базе научно-технического задела, соответствующего уровню авиационных ГТД пятого поколения, может быть создан двигатель с вдвое большей тягой, такой же простой конструкцией, как у дви-

Параметр	Значение для	
	РД-48	ТРДД
Тяга P , кН	41	80
Диаметр входа D , мм	635	970
Температура газа перед рабочим колесом $T_{Г,к}$, К	1453	1700
Температура газа в сопле $T_{Г,с}$, К	1340	1300
Расход воздуха через двигатель G_b , кг/с	53,5	120
Удельный расход топлива $G_{уд}$, кг/даН·ч	1,38	0,86
Суммарная степень повышения давления в компрессоре π_k^*	6,28	11,6
Длина двигателя L , мм	1542	1550
Частота вращения ротора n , мин ⁻¹	12 450	10 000
Удельная масса двигателя γ , кг/даН	0,079	0,05

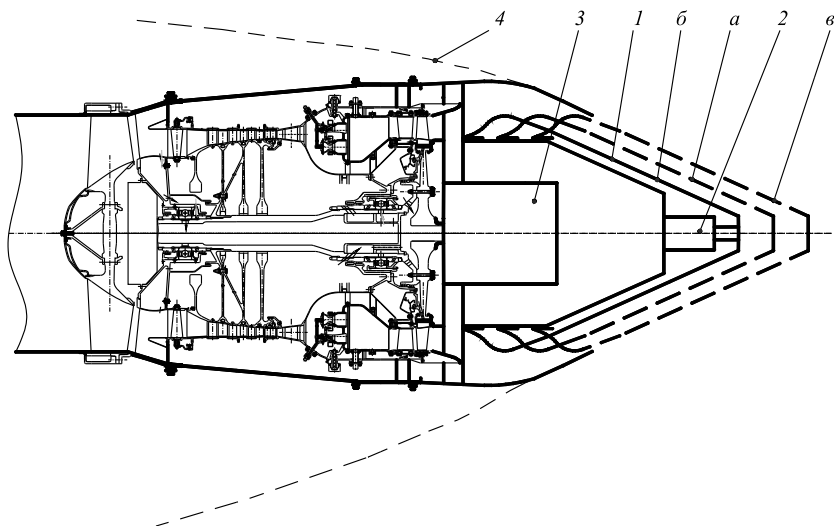


Рис. 2. Конструктивная схема бустерного двигателя с функцией ВСУ для перспективной силовой установки:

1 — выдвигной конусный корпус; 2 — электропривод; 3 — электрогенератор; 4 — контур хвостовой части фюзеляжа

двигателя РД-48, и в пределах его длины (является критическим параметром). Удельный расход топлива $G_{уд}$ может быть на 40 %, а удельная масса γ на 30 % меньше, чем у РД-48, т. е. достигнуть рекордного наименьшего значения $\gamma = 0,05$ кг/даН.

За основу нового бустерного двигателя с функцией ВСУ (рис. 2) для оптимизации силовой установки, реализации технологии "Более электрический самолет" и предлагается использовать научно-технический задел по данной разработке. Придание двигателю дополнительной функции привода электрогенератора сравнительно большой мощности повысит его значимость.

Предлагаемые изменения в конструкции двигателя (далее — установки) вызваны необходимостью значительного изменения площади проходного сечения выходного устройства в зависимости от режима работы и условий размещения его в хвостовой части фюзеляжа (см. рис. 2).

Выходное устройство установки (см. рис. 2) в затурбинном коке содержит выдвигной конусный корпус 1 с электроприводом 2 и электрогенератор 3.

Установка имеет три режима работы и соответствующие им положения корпуса 1 в выходном устройстве:

1. Режим работы как бустерного двигателя — создание дополнительной тяги на взлете и в аварийной ситуации, например при отказе основного двигателя. Корпус 1 выходного устройства занимает положение *а*, при этом реализуется максимальная тяга. Воздух на вход установки подается при открытых створках входного устройства в хвостовой части фюзеляжа (на рис. 2 не показаны). С электрогенератора снимается промежуточное значение мощности.

2. Режим работы как ВСУ — обеспечение самолета на стоянке и при рулении (с отключенными основными двигателями) электрическим питанием при минимальном расходе топлива. Выходное устройство полностью раскрыто — корпус 1 занимает положение *б*. На турбине реализуется максимальный перепад давлений для получения максимальной мощности на электрогенераторе, при этом тяга и расход топлива минимальны. При наличии электропривода колес основные двигатели выключены.

3. Установка отключена на крейсерских режимах полета. Выходное устройство перекрыто — корпус 1 занимает положение *в*. Створки входного устройства закрыты.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Созданный научно-технический задел для ГТД пятого поколения позволяет создать подъемные бустерные ГТД простой конструкции с рекордно низкой удельной массой 0,05 кг/даН и на 40 % лучшей экономичностью, что должно поднять их востребованность.

2. Бустерный двигатель с функцией ВСУ обеспечит оптимизацию на режимах взлета и крейсерском, повысит надежность перспективной (особенно двухдвигательной) силовой установки самолета и реализацию технологии "Более электрический самолет"; повысит электрическую мощность силовой установки при пиковых нагрузках, например на режимах руления и взлета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В.** Полностью электрический самолет // Авианепанорама. № 2 (74). 2009.
2. **Умеренная** гибридизация — путь к электрическим СУ на ближайшую перспективу // Обзорение ЦИАМ по материалам иностранных публикаций № 7, IV — 2020.
3. **Полная** энциклопедия мировой авиации. Самара: Федоров, 1997. 928 с.
4. **Дынкин А. Л.** Самолет начинается с двигателя. В 2 кн. Рыбинск: Рыбинское подворье, 1998. Кн. 2. 544 с.
5. **Богданов В. И.** Концепции совершенствования газотурбинных двигателей за счет применения высокочастотных турбин // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 93—99.
6. **Богданов В. И.** Применение высокочастотной неохлаждаемой турбины в перспективных ГТД ограниченной мощности // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 40, 41.

А. В. КОЧЕТКОВ, д-р техн. наук (Пермский НИПУ), П. М. САЛОВ, д-р техн. наук (Чувашский ГУ им. И. Н. Ульянова), А. А. ИГНАТЬЕВ, д-р техн. наук, В. А. ДОБРЯКОВ, канд. техн. наук, О. В. ЗАХАРОВ, д-р техн. наук (Саратовский ГТУ им. Ю. А. Гагарина), e-mail: zov20@mail.ru

Компьютерная поддержка формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом

Предложено аналитическое описание процесса выполнения винтовых поверхностей дисковым инструментом с обоснованным определением целевой функции. По аналогии с координатной метрологией предложено в качестве целевой функции принятие зоны минимального допуска. Это позволяет задавать требуемую погрешность решения и исключает необходимость использования нормалей или касательных к профилям. Представлен пример расчета профиля винтовой канавки, двузубой концевой фрезы, выполненного с погрешностью 0,05 мм.

Ключевые слова: винтовая поверхность, дисковый инструмент, компьютерная поддержка, оптимизация, минимальный допуск.

An analytical description of the process of making helical surfaces with a disk tool with a substantiated definition of the objective function is proposed. By analogy with coordinate metrology, it is proposed to adopt a minimum tolerance zone as an objective function. This allows to specify the required solution error and eliminates the need to use normal lines or tangents to the profiles. An example of calculating the profile of a helical groove of a two-toothed end mill, performed with an error of 0.05 mm is presented.

Keywords: helical surface, disk tool, computer support, optimization, minimum tolerance.

Винтовые поверхности используются в деталях различных механизмов и машин: в червячных передачах автомобилей, винтовых насосах, осевых и цилиндрических режущих инструментах, бор-фрезах [1–6]. Обработка винтовой поверхности является трудоемким, дорогостоящим и технологически сложным процессом. В настоящее время применяют дисковый инструмент в виде фрез для черновой обработки и шлифовальных кругов для чистовой обработки. При этом обеспечивается высокая производительность при обработке как на универсальных трехкоординатных фрезерных станках, так и на пятикоординатных обрабатывающих центрах. Вместе с тем профилирование дискового инструмента и расчет параметров его установки на станке требуют создания математических моделей.

Сформировавшиеся к настоящему времени подходы к математическому описанию процесса формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом можно условно разделить на три группы. К первой группе относят графические и

аналитические методы расчета винтовой поверхности при заданной форме инструмента и постоянных параметрах наладки станка [7–11]. Инструмент может иметь сложную форму рабочей поверхности, которая описывается совокупностью опорных точек в осевом сечении. С развитием ЭВМ получил применение численный метод решения, при котором не используются уравнения нормалей и касательных. Ко второй группе относят частные решения задачи формообразования при аналитически заданной поверхности инструмента в виде тора, конуса и постоянных параметрах наладки станка [12–16]. Данный подход был исторически первым и получил применение при обработке резьб и червяков зубчатых передач на специальных станках. Третий подход основан на оптимизации параметров инструмента и параметров его установки на станке [17–19]. В этом случае одним и тем же инструментом можно обрабатывать различные винтовые поверхности с некоторым приближением к заданному профилю. Как правило, инструмент имеет технологически простую форму рабочей поверхности в виде цилиндра, конуса, тора и их сочетаний. Дополнительно можно поставить задачу выбора инструмента из имеющейся номенклатуры или оптимизации конструктивных размеров инструмента. Такой подход стал широко применяться только в последнее время, так как требует значительной вычислительной мощности ЭВМ.

Несомненное преимущество третьего подхода раскрывается в мелкосерийном производстве при обработке как на универсальных станках, так и на обрабатывающих центрах. Оптимизация установочных параметров позволяет отказаться от профилирования специального инструмента для каждой винтовой поверхности и сократить номенклатуру стандартного инструмента на предприятии. Однако при этом используется более сложный математический аппарат на основе параметрической оптимизации. Разработанные к настоящему времени CAD/CAM/CAE программы позволяют решать широкий круг задач: расчет винтовой поверхности, моделирование траектории перемещения инструмента, расчет съема припуска [7, 11, 15, 17]. Однако известные программы не предназначены для решения оптимизационных задач в указанной постановке.

Наибольшую практическую сложность составляет постановка задачи оптимизации и выбора це-

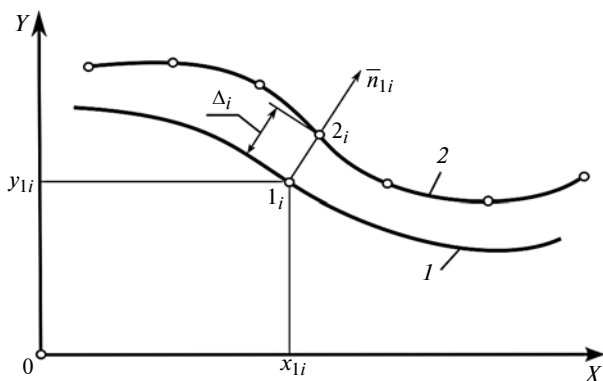


Рис. 1. Координатная схема для сравнения профилей

левой функции. От формализации этой задачи зависит не только погрешность, но и сама возможность получения винтовой поверхности заданного профиля. В общем случае невозможно гарантировать сходимость решения при сложном многоэлементном профиле винтовой поверхности. Принципиальная сложность заключается в том, что для сравнения получаемого профиля с заданным необходимо задать или найти соответствующие точки на двух профилях. В этой ситуации исследователь сталкивается с несколькими затруднениями. Во-первых, не всегда имеется аналитическое описание заданной и получаемой поверхностей. Как правило, полученная по расчету винтовая поверхность описана совокупностью винтовых линий от опорных точек. Если заданная поверхность описана геометрически точно, то требуется определить точку 1_i на заданном профиле 1 , нормаль n_{1i} к которой проходит через полученную опорную точку 2_i (рис. 1). Решение этой задачи по аналогии с работой [20] сводится к прохождению нормали к заданному профилю через опорную точку полученного профиля. Для этого решается система из двух уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = f(x_1); \\ y_1 = (x_1 - x_2) \frac{n_{1y}}{n_{1x}} + y_2, \end{cases}$$

где $f(x_1)$ — уравнение заданного профиля; n_{1x}, n_{1y} — проекции нормали на оси x, y к заданному профилю; x_2, y_2 — декартовы координаты опорной точки на полученном профиле.

Отклонение Δ_i полученного профиля от заданного в i -й точке рассчитывается по формуле

$$\Delta_i = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Если аналитическое описание заданного профиля отсутствует, то можно использовать кубическую сплайн-аппроксимацию [21]. Для получаемого профиля аппроксимация не требуется, так как она позволяет лишь увеличить число промежуточных

точек. Этот же результат достигается увеличением числа исходных точек на производящей поверхности инструмента.

Таким образом, первая сложность заключается в необходимости введения в расчетный алгоритм дополнительной процедуры расчета отклонений профилей с учетом направления нормалей.

Из рассмотренной особенности расчета вытекает вторая трудность — неоднозначность решения для некоторых профилей. Принципиальная неоднозначность возникает при различной длине заданного 1 и полученного 2 профилей. Обычно вначале совмещают профили таким образом, чтобы их крайние левые точки совпали (рис. 2). Для этого осуществляют поворот одного из профилей вокруг точки 0 . При существенном различии длин профилей становится невозможным сопоставить две точки на заданном 1 и полученном 2 профилях. Например, на рис. 2 полученный профиль длиннее заданного и точке 2_j полученного профиля не соответствует ни одна из точек на заданном профиле. Вторая ситуация, приводящая к неоднозначности решения, заключается в наличии двух точек на заданном профиле, соответствующих одной точке на полученном профиле. Данный случай иллюстрируют точки $1'_i$ и $1''_i$ заданного профиля, соответствующие точке 2_i на полученном профиле (см. рис. 2).

Наконец, последняя, третья трудность заключается в описании целевой функции при оптимизации. Традиционно для этого используют метод наименьших квадратов, а целевая функция имеет вид:

$$F = \sum_i \Delta_i^2.$$

Окончание поиска регулируется числом итераций, значением целевой функции или шагом изменения оптимизируемых параметров. В этом случае не накладывается ограничений на саму величину отклонения получаемого профиля от заданного. Очевидно, что, определив оптимальные параметры установки инструмента на станке, можно затем рассчитать отклонения профилей и принять решение

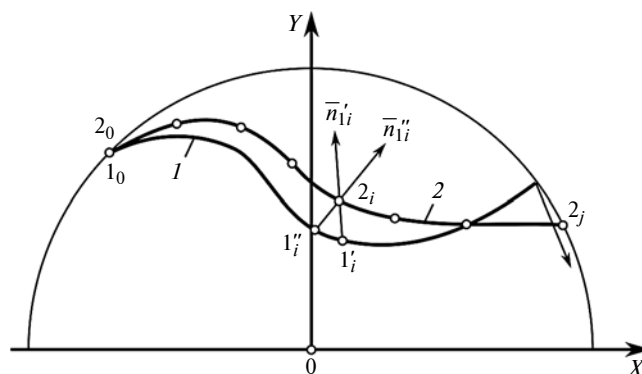


Рис. 2. Координатная схема для совмещения торцевых профилей

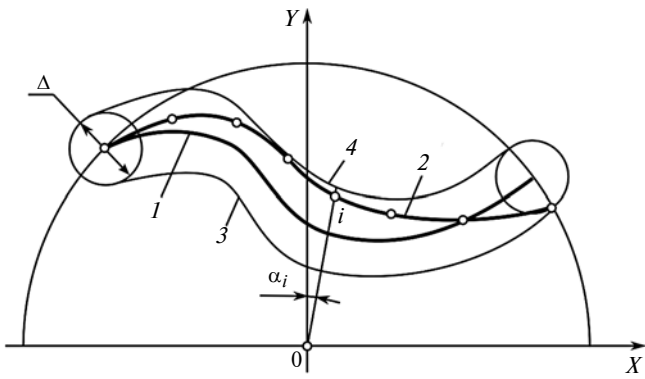


Рис. 3. Схема для определения зоны минимального допуска профиля

о соответствии погрешности. Однако целесообразно задавать требования к погрешности в самой целевой функции.

Исключить указанные трудности позволяет предлагаемый подход на основе минимальной зоны допуска. Такой подход в настоящее время хорошо зарекомендовал себя в практике координатных измерений [22–24]. Его суть заключается в минимизации собственно допуска на погрешность профиля. Поле допуска представляет собой зону, ограниченную двумя эквидистантными кривыми, а сам допуск Δ есть радиус этой окружности (рис. 3). Тогда целевая функция будет равна допуску на профиль:

$$F = \Delta = \max(r_4 - r_2) + \max(r_2 - r_3),$$

где r_3 и r_4 — радиусы внутренней и внешней эквидистанты заданного профиля.

При таком задании целевой функции не накладываются ограничения на длину профиля и не используются нормали или касательные к профилю. Это позволяет избежать неоднозначности решения и исключить процедуру расчета нормалей и их пересечения с профилем. Расчет эквидистантных кривых не представляет сложности как для аналитически заданного профиля, так и для профиля, состоящего из опорных точек.

Предлагается следующий практический алгоритм расчета целевой функции. Для заданного профиля винтовой поверхности рассчитывают внутреннюю и внешнюю эквидистантные кривые $r_3(\alpha)$, $r_4(\alpha)$ по известному алгоритму. Полученный профиль поворачивают вокруг начала координат 0 до совпадения крайней левой точки с аналогичной точкой заданного профиля. Рассчитывают углы α_i , соответствующие i -м опорным точкам радиуса r_{2i} полученного профиля винтовой поверхности. Для всех i -х опорных точек определяют выражения $(r_{4i} - r_{2i})$ и $(r_{2i} - r_{3i})$ и затем целевую функцию. Варьируемыми параметрами при оптимизации выступают три параметра установки инструмента на станке и от двух до шести параметров, характери-

зующих конструктивные размеры профиля инструмента. Назначают требуемую максимальную погрешность $\Delta_{\text{доп}}$ обработки профиля. Поиск минимума целевой функции завершают при достижении значения $\Delta_{\text{доп}}$.

Рассмотрим применение предложенного подхода для обработки винтовой канавки с ходом $p = 90$ мм двузубой концевой фрезы с торцевым профилем, показанным на рис. 4 и заданным 17-ю опорными точками. Инструмент представляет собой двухугловую фрезу радиусом R , шириной a с углами φ_1 , φ_2 и радиусом скругления r (рис. 5). Воспользуемся численной методикой расчета профиля винтовой поверхности, изложенной в работе [25]. Оптимизируемыми параметрами будут пять конструктивных размеров фрезы и три параметра его установки на станке — кратчайшее межосевое расстояние A , угол λ скрещивания осей фрезы и детали и наладочное смещение L вдоль оси Z . Получены следующие результаты оптимизации параметров при назначенном допуске $\Delta = 0,05$ мм. Параметры инструмента: $R = 36,56$ мм, $a = 41,3$ мм, $\varphi_1 = 63,24^\circ$,

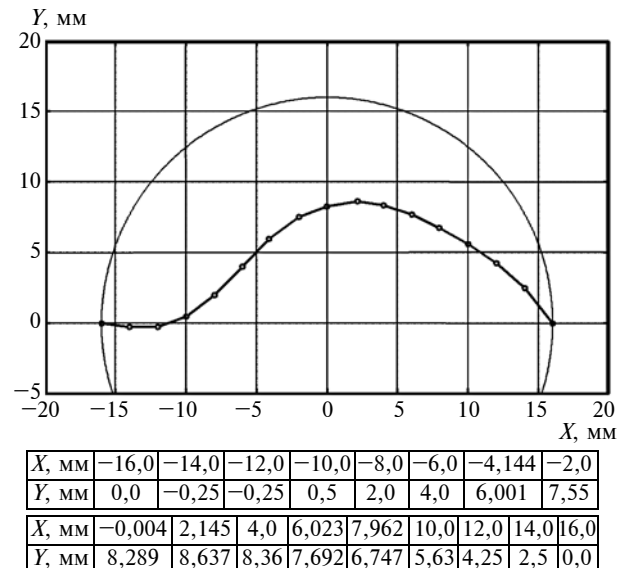


Рис. 4. Торцевой профиль винтовой канавки двузубой концевой фрезы

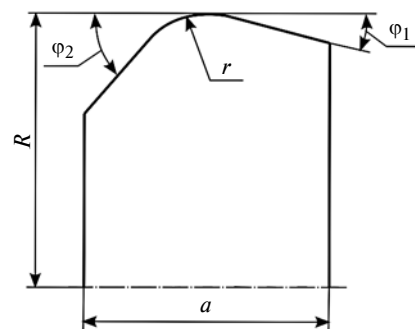


Рис. 5. Конструктивные размеры дискового инструмента

$\varphi_2 = 19,27^\circ$, $r = 5,78$ мм. Параметры установки инструмента на станке: $A = 37,32$ мм, $\lambda = 38,61^\circ$, $L = 12,74$ мм.

Таким образом, научно обоснован новый подход к аналитическому описанию процесса формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом. Сущность этого подхода заключается в оптимизации параметров инструмента и его установки на станке для наилучшего приближения получаемого профиля к заданному. Критерием оценки выступает минимальная зона допуска профиля. Целевая функция при оптимизации представляет собой допуск на погрешность профиля винтовой поверхности в виде зоны, ограниченной двумя эквидистантными кривыми. Для практической реализации разработан алгоритм, построенный на численных методах решения. Преимуществом предложенного алгоритма является отсутствие ограничений на аналитическое задание профиля, так как не требуется знание направления нормалей или касательных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Баранов М. Н., Иванова Т. Н., Латыпов Р. Г. Исследование работоспособности глубинных насосов // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 1. С. 36–39.
2. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Рычков Д. А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение. 2015. Т. 15. № 1. С. 35–46.
3. Мальков О. В., Павлюченков И. А., Козяр В. Н. Профилирование стружечных канавок резьбовых фрез // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 3. С. 3–13.
4. Fomin A. A., Gusev V. G., Timerbaev N. F. Providing of Surfaces' Geometry at the Design Stage of Profile Milling Operation of Off-Grade Workpiece // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 865–873.
5. A profile error compensation method in precision grinding of screw rotors / Zongmin Liu, Qian Tang, Ning Liu, Jun Song // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. V. 100. P. 2557–2567.
6. Khisamutdinov R. M., Sungatov I. Z., Khisamutdinov M. R. Kinematics of Spherical Milling Cutters Forming // Procedia Engineering. 2017. V. 206. P. 1292–1297.
7. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента / Гречишников В. А., Домнин П. В., Косарев В. А. и др. // СТИИ. 2013. № 12. С. 6–11.
8. Petukhov Yu. E., Domnin P. V. Numerical Shaping Method for Hobbing Tools // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. P. 76–78.
9. Chemborisov N. A., Sungatov I. Z., Khisamutdinov R. M. Determining the contact zone in disk machining of a complex spherical mill // Russian Engineering Research. 2013. V. 33. P. 243.
10. Lyashkov A. A., Panchuk K. L. Computer modeling of a pump screw and disc tool cross shaping process // Procedia Engineering. 2015. V. 113. P. 174–180.
11. Guochao Li, Honggen Zhou, Xuwen Jing et al. Modeling of integral cutting tool grooves using envelope theory and numerical methods // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 98. P. 579–591.
12. Popa C. L., Popa V. Profiling disk tool for generating female rotor screw compressor component by meaning of graphical method // Procedia Manufacturing. 2018. V. 22. P. 85–92.
13. Ryabov E. A., Khisamutdinov R. M., Yurasov S. Y. et al. Ball end mill with curved cutting edge and constant cutting geometry // Russian Engineering Research. 2018. V. 38. P. 1015–1017.
14. Fomin A. A., Gusev V. G., Sattarova Z. G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools // Solid State Phenomena. 2018. V. 284. P. 281–288.
15. A novel approach to wheel path generation for 4-axis CNC flank grinding of conical end-mills / J. Yang, L. Wang, Y. Fang, J. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 109. P. 1–14.
16. Волков А. Э., Медведев В. И. Задачи синтеза и анализа профилирования инструмента для шлифования винтовых поверхностей // Вестник ИЖГТУ им. М. Т. Калашникова. 2017. № 2. С. 51–54.
17. Ляшков А. А. Компьютерное моделирование процесса формообразования дисковой фрезой деталей с винтовой поверхностью // СТИИ. 2012. № 1. С. 26–29.
18. Иванов В. А., Перевозников В. К. Исследование параметров установки дисковых инструментов, обрабатывающих винтовые сложнопрофильные поверхности // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 4. С. 7–16.
19. Brzhozovskii B. M., Zakharov O. V., Kochetkov A. V. Numerical Shaping of a Disk Tool for the Machining of Helical Surfaces // Russian Engineering Research. 2014. V. 34. P. 740–742.
20. Grechnikov F. V., Rezhnikov A. F., Zakharov O. V. Iterative Method of Adjusting the Radius of the Spherical Probe of Mobile Coordinate-Measuring Machines When Monitoring a Rotation Surface // Measurement Techniques. 2018. V. 61. P. 347–352.
21. Хаймович И. Н., Клентак Л. С. Усовершенствование методов сглаживания сложных поверхностей с использованием интерполяционных сплайнов // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–12. С. 2634–2638.
22. Pechenin V. A., Bolotov M. A., Ruzanov N. V. Technique of Decomposition of Form Deviation for Freeform Surfaces // Key Engineering Materials. 2016. V. 685. P. 334–339.
23. Ruzanov N. V., Bolotov M. A., Pechenin V. A. Development of compensation procedure for systematic errors of coordinate measuring machines with standard tooling // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V. 9. P. 1082–1086.
24. Zakharov O. V., Bobrovsky N. M., Kochetkov A. V. et al. A sphericity measurement method based on the minimum measuring zone // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1785. Issue 1. P. 040094.
25. Погораздов В. В., Захаров О. В. Геометро-аналитическая поддержка технологий формообразования винтовых поверхностей: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2004. 72 с.

А. Я. РЫЗВАНОВИЧ, канд. техн. наук, В. А. ГЕНЕРАЛОВ
(Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
Министерства обороны Российской Федерации), e-mail: galia712@yandex.ru

Новые технические решения в конструкции импульсного вариатора, расширяющие области использования импульсного движения

Предложены новые области применения импульсного движения бесступенчато-регулируемого привода лесопильных рам и червячных прессов.

Ключевые слова: импульсный вариатор, лесопильная рама, толчковая подача, привод, червячный пресс.

New areas of application of the impulse motion of the continuously variable drive of sawmills and worm presses are proposed.

Keywords: pulse variator, sawmill frame, jog feed, drive, worm press.

Импульсные вариаторы являются устройствами с чередованием рабочего и холостого хода, а движение ведомому валу передается периодическими импульсами, что хорошо иллюстрирует тахограмма, представленная на рис. 1, с рабочим участком m_1n_1 , переходящим в холостой участок $n_1c_1d_1fd_3b_3n_2$, которые описываются уравнениями [1]:

рабочий участок:

$$\varphi_1(\alpha) = \frac{1}{i_c} \left(\frac{3 + \delta}{3} - \frac{4\delta}{\pi^2} \alpha^3 \right) + R_2;$$

холостой участок:

$$\varphi_2(\alpha) = \frac{A}{a} \left[\sin a(\alpha - \pi) + \sin aR_1 - B \left(\alpha - \frac{k\pi}{2} \right) \right],$$

где i_c — среднее передаточное число вариатора; δ — коэффициент неравномерности хода ведомого вала вариатора; φ и α — углы поворота соответственно ведомого и ведущего валов вариатора; k — коэффициент перекрытия параболического участка тахограммы; a, A, B, R_1 и R_2 — константы.

Для того чтобы вращение ведомого вала не сопровождалось выстоем, т. е. было непрерывным, в вариаторах используется

несколько преобразующих механизмов (от двух до четырех) [2], кривошпы которых равномерно сдвинуты на определенный угол, а их рабочие ходы перекрывают холостые, обеспечивая тем самым непрерывное движение ведомого вала.

Однако существует область станкостроения, в которой рабочее движение чередуется с выстоем и является предпочтительным, это — деревообрабатывающая промышленность [3]. Основная продукция из древесины вырабатывается на лесопильных рамах, выпускаемых в г. Данилов Ярославской области для наших потребителей и зарубежных (поставляется в 24 страны мира). Несмотря на высокую производительность данная пила имеет существенные недостатки. Это — большая металлоемкость, непрерывная подача бревна при распиловке, многоступенчатая коробка скоростей.

При непрерывной подаче бревна его постоянное давление на пилы пильной рамки как в режиме резания, так и на холостом ходе, резко возрастает в верхнем и нижнем мертвых положениях рамки и особенно в начале хода пил вверх, что может привести к пробуксовке механизма подачи.

Прерывистая подача (толчковая) позволяет синхронизировать и совместить по фазе рабочее движение пильной рамки (собственно резание) и толчковое движение бревна (рис. 2), что снижает пиковые нагрузки.

Такой механизм [4] подачи (рис. 3) содержит корпус 1, в котором смонтирован регулировочный механизм (РМ) с регулировочным валом 3, несущим на себе звездочку 4, которая цепью 5 связана со звездочкой коренного вала 6 лесопильной рамы.

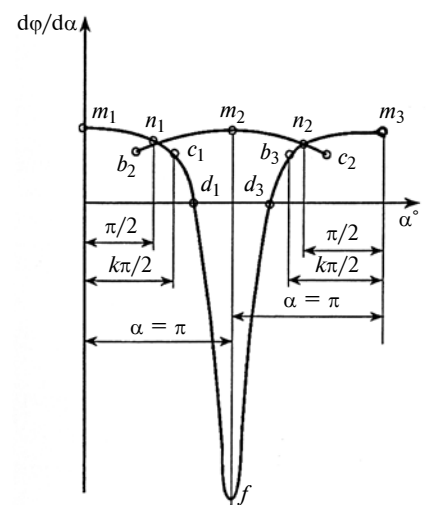


Рис. 1. Тахограмма импульсного вариатора:

m_1n_1 — рабочий ход; $n_1c_1d_1fd_3b_3n_2$ — холостой ход

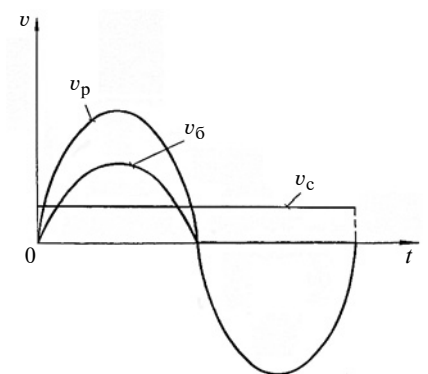


Рис. 2. Тахограмма толчковой подачи лесопильной рамы:

v_p — скорость движения пильной рамки; v_b — скорость движения бревна при непрерывной подаче; v_c — скорость движения бревна при толчковой подаче

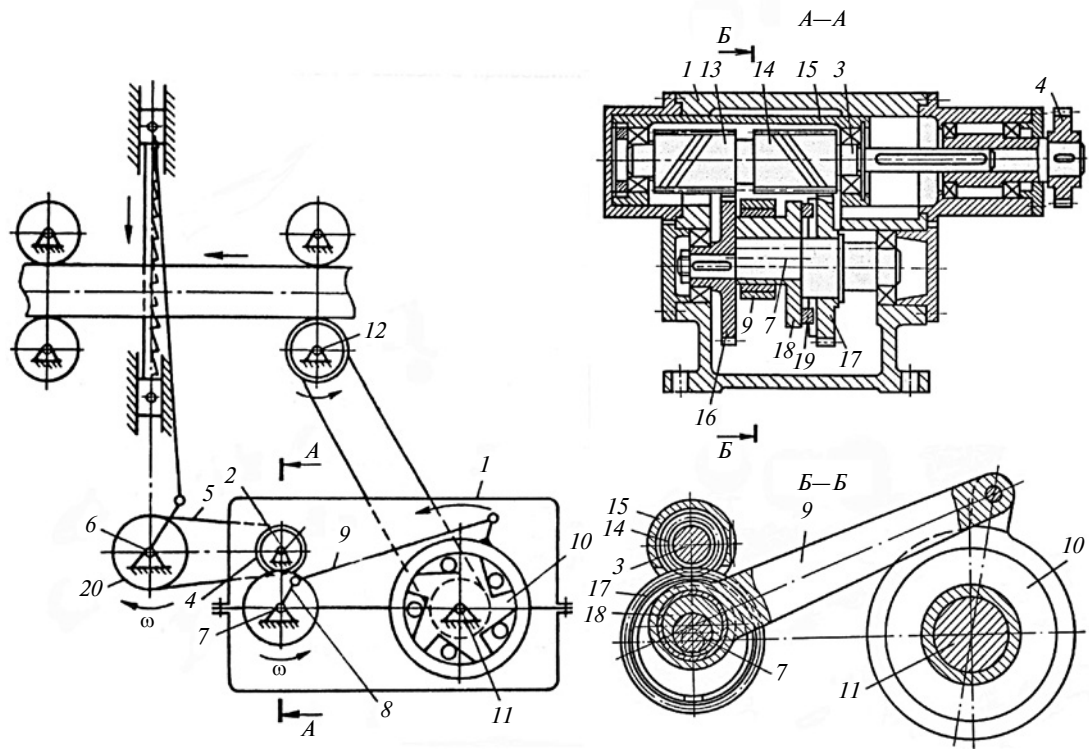


Рис. 3. Механизм привода лесопильной рамы:

привод толчковой подачи пилорамы (разрез А—А), преобразующий механизм и механизм свободного хода вариатора (разрез Б—Б)

Регулировочный механизм 2 связан с кривошипным валом 7 с кривошипом изменяемой длины. Кривошип 8 шатуном 9 и обгонной муфтой 10 механизма свободного хода (МСХ) связан с ведомым валом 11, соединенным с подающими вальцами 12, при этом передаточное отношение от коренного вала 6 к кривошипному 7 равно единице. Вращение коренного вала 6 с помощью цепной передачи 5 передается регулировочному валу 3 и далее — кривошипному валу 7. От кривошипа 8 приводится в движение шатун 9, а от него через МСХ ведомый вал 11 и подающие вальцы 12. Изменяя радиус кривошипа 8, изменяем величину подачи. В зависимости от расположения кривошипа ведомый вал получает рабочее движение, чередуясь с выстоем, соответствующим холостому ходу пильной рамки.

Конструкция привода механизма толчковой подачи вариатора представлена на разрезе А—А. Здесь в корпусе 1 размещен механизм регулирования 2 с регули-

ровочным валом 3. Собственно механизм (РМ) [6] имеет две косозубые шестерни 13 и 14 с одинаковым числом зубьев, но с противоположным углом наклона, жестко посаженные на вал 3. Узел регулировочного вала на подшипниках качения установлен в гильзе 15, помещенной в корпусе 1 с возможностью перемещения вдоль оси от внешнего устройства (на рис. 3 не показано).

Шестерни 13 и 14 кинематически связаны с косозубыми колесами 16 и 17, также имеющими одинаковое число зубьев, но противоположный угол наклона [4]. Колесо 16 жестко, а колесо 17 подвижно смонтированы на кривошипном валу 7. Кривошипно-коромысловый преобразующий механизм (ПМ) состоит из кривошипа 8 регулируемой длины в виде эксцентриковой втулки 18, подвижно смонтированной на эксцентричной шейке вала 7 и с помощью кольца 19 кинематически связанной с колесом 17. Шатун 9 через подшипник скольже-

ния надет на втулку 18, а другим концом связан с ведущим элементом 10 МСХ.

На регулировочном валу 3 установлена звездочка 4, связанная цепной передачей 5 со звездочкой 20, установленной на коренном валу 6 лесопильной рамы. Передаточные отношения между парами косозубых колес кривошипного 7 и регулировочного 3 валов равны, а общее передаточное отношение от коренного вала 6 к кривошипному 7 равно единице.

Механизм толчковой подачи работает следующим образом: вращение от коренного вала 6 через цепную передачу сообщается регулировочному валу 3, а затем через косозубую зубчатую передачу 13 и 16 (см. разрез А—А) кривошипному валу 7, от которого через шатун 9 и МСХ вращение передается на ведомый вал 11, а от него — на подающие вальцы 12.

При обратном ходе шатуна (см. разрез Б—Б) МСХ ведущий элемент 10 совершает холостой

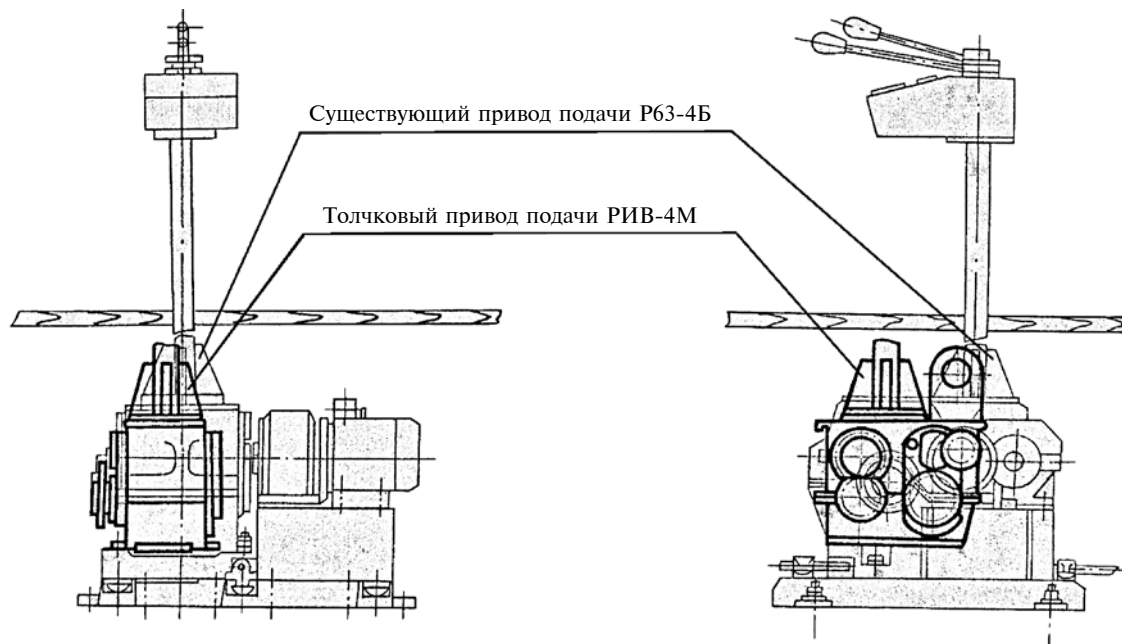


Рис. 4. Сравнительные габаритные размеры существующего механизма (показан тонкими линиями) и бесступенчато-регулируемого на раме Р63-4Б

ход и движение на подающие вальцы 12 не передается. Регулирование величины толковой подачи осуществляется изменением суммарного эксцентриситета кривошипа 7. Для этого регулировочный вал 3 смещают вдоль его оси, при этом в косозубых парах 13–16 и 14–17 (см. А–А) возникают окружные усилия, поворачивающие колесо 17 на шейке кривошипного вала 7. Колесо 17, взаимодействуя с эксцентриковой втулкой 18 посредством кольца 19, поворачивает ее относительно эксцентричной шейки вала 7, изменяя ее суммарный эксцентриситет и, следовательно, величину кривошипа 8 с последующим изменением рабочего хода шатуна 9, а вместе с этим и величины подачи вальцов 12 [6].

Импульсный вариатор как механическая бесступенчато-регулируемая передача наиболее полно отвечает обеспечению технологического процесса резания бревен различных пород древесины с различными геометрическими и прочностными параметрами [5]. Новые технические решения реализованы в конструкции вариатора [7], специально спроектированного для привода главно-

го движения пилорамы Р63-4Б (ее коренного вала) Даниловского завода деревообрабатывающих станков.

На рис. 4 в одинаковом масштабе представлены контуры существующего привода и бесступенчато-регулируемого. Так как модернизированный привод изготовлен из обычных машино-

строительных сталей по традиционной технологии, его изготовление не дороже существующего и сопровождается снижением габаритно-весовых параметров и интенсификацией процесса резания [5].

Применение импульсного привода приводит к упрощению конструкции и уменьшению га-

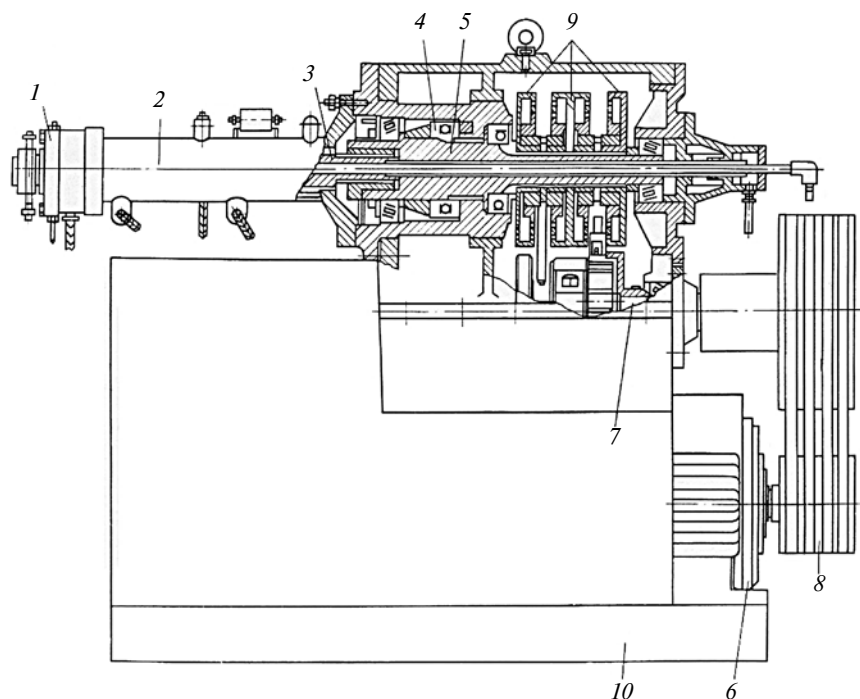


Рис. 5. Импульсный привод червячного пресса

Б. А. ГОРДЕЕВ, д-р техн. наук, В. И. ЕРОФЕЕВ, д-р физ.-мат. наук, С. Н. ОХУЛКОВ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т проблем машиностроения РАН, Нижегородский ГТУ им. П. Е. Алексеева), А. С. ПЛЕХОВ, канд. техн. наук (Нижегородский ГТУ им. П. Е. Алексеева), А. В. ВАНЯГИН (Ин-т прикладной физики РАН), e-mail: gord349@mail.ru; oxulkovs@mail.ru

Условия применимости линейных моделей, описывающих распространение акустических волн¹

Рассматриваются условия применимости линейных моделей, описывающих взаимодействие зондирующих акустических волн с вибрационными и акустическими полями. В математические модели введены параметры, позволяющие оценить степень нелинейности и определить их дальнейшее применение.

Ключевые слова: дисперсия, реологическая среда, монохроматические волны, спектральное разложение.

The conditions for the applicability of linear models describing the interaction of sounding acoustic waves with vibrational and acoustic fields are considered. Parameters are introduced into the mathematical model to assess the degree of nonlinearity and determine their further application.

Keywords: dispersion, rheological medium, monochromatic waves, spectral decomposition.

Для определения характера переходных процессов в электродвигателях при пуске, торможении и изменении скорости, а также для формирования

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

требований к системам управления виброзащитой необходимы исследования взаимодействия вибрационных и акустических полей в электромеханических комплексах. Если в качестве средств измерения вибрационных полей используют зондирующие акустические сигналы, то предварительно необходимо определить границы линейной зоны, в которой информация о движении границы раздела сред передается без искажений.

В работе [1] рассмотрены вопросы распространения волн в нелинейных средах без дисперсии и задачи нелинейной акустики в твердых телах. Однако при возбуждении волн одной частоты и возрастающих по амплитуде с течением времени линейная среда становится нелинейной, гармонический акустический сигнал искажается, возникают высокочастотные гармоники, распространяющиеся с разными скоростями. Следовательно, данная среда будет обладать некоторой дисперсией, что влечет за собой быстрое затухание модулированных волн, несущих полезную информацию.

В работе [2] рассмотрены вопросы взаимодействия вибрационных и акустических полей в нелинейных средах. Однако там рассматриваются, в ос-



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 15)

баритных размеров машин для непрерывной обработки полимерных материалов, например для червячных прессов [8]. В отличие от известных конструкций [9], новая конструкция (рис. 5) имеет головку 1, цилиндр 2, червяк 3, упорный подшипник 4 и связанный с червяком шпиндель 5 упорного подшипника. Привод пресса состоит из электродвигателя 6 и импульсного вариатора 7, соединенных клиноременной передачей 8. На шпинделе 5 неповоротно установлены элементы 9 МСХ и импульсного вариатора 7. И технологический, и приводной узлы размещены на станине 10.

Вращение электродвигателя 6 передается ведущему валу вариатора 7, а затем через его ПМ — ведущим элементам МСХ и преобразуется во вращение ведомых элементов МСХ, а следовательно, шпинделя 5 и упорного подшипника с червяком 3. Такая компоновка упрощает конструкцию пресса, уменьшает его габаритные размеры, обеспечивая необходимый диапазон регулирования.

тора 7, а затем через его ПМ — ведущим элементам МСХ и преобразуется во вращение ведомых элементов МСХ, а следовательно, шпинделя 5 и упорного подшипника с червяком 3. Такая компоновка упрощает конструкцию пресса, уменьшает его габаритные размеры, обеспечивая необходимый диапазон регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Рызванович А. Я., Генералов В. А., Капралов В. В. Вибрационная обработка с крутильными колебаниями шпинделя // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 31–35.

2. Кропш А. Е. Приводы машин с импульсными вариаторами. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

3. Афанасьев П. С. Станки и инструменты деревообрабатывающих предприятий. М.: Лесная промышленность, 1968. 496 с.

4. А. с. 1675081 СССР: МКИ В27В 3/16. Механизм толчковой подачи лесопильной рамы.

5. А. с. 462658 СССР: МКИ В23В 1/100. Способ интенсификации процесса резания.

6. А. с. 1257335 СССР: МКИ F16H 21/02. Кривошипный механизм с кривошипом регулируемой длины.

7. А. с. 1007509 СССР: МКИ F16H 29/02. Импульсный вариатор.

8. А. с. 618293 СССР: МКП² В29С 3/00. Червячный пресс.

9. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. Л.: Госхимиздат, 1962. 468 с.

новном, распространение волн в твердых телах, а акустические сигналы, распространяющиеся в реологических средах (газах, жидкостях) и несущих информацию о перемещениях, рассмотрены с метрологических позиций недостаточно.

В линейных средах волновые процессы, описываемые линейными уравнениями, обладают свойством суперпозиции, которое заключается в том, что различные пространственно-временные спектральные составляющие волновых полей — плоские монохроматические волны, которые распространяются без искажений и не взаимодействуют друг с другом. Это важное условие является основой для разработки концепции новых средств измерения параметров вибрационных и акустических полей с использованием слабых относительно исследуемых процессов акустических сигналов.

Среда, обладающая линейными свойствами, представляет собой некоторую идеализированную модель. Применимость модели данной среды зависит в первую очередь от отношения $A/A_{\text{хар}}$ (где A — амплитуда излученного акустического сигнала — гармонического; $A_{\text{хар}}$ — амплитуда отраженного акустического сигнала от исследуемого объекта), которое определяет упругие свойства среды [3]. В акустике $A_{\text{хар}}$ определяет давление среды. В линейной среде предполагается, что отношение $A/A_{\text{хар}}$ пренебрежимо мало, поэтому волновое уравнение становится линейным:

$$\Delta\varphi - (1/c^2)\partial^2\varphi/\partial t^2 - L_1(U) = 0,$$

где L_1 — линейный оператор, описывающий дисперсию и диссипацию среды.

Если учитывать величину $A/A_{\text{хар}}$, то в волновом уравнении необходимо сохранить нелинейные члены:

$$\Delta\varphi - (1/c^2)\partial^2\varphi/\partial t^2 - L_1(U) = L_2(U^2) + L_3(U^3) + \dots,$$

где L_2, L_3, \dots, L_n — нелинейные операторы, имеющие порядок $[A/A_{\text{хар}}]$ относительно линейного члена.

Учет нелинейных членов в волновом уравнении описывает качественно новые явления. В простейшем случае, когда на вход нелинейного объекта падает монохроматическая волна $U = A\sin(\omega t - \vec{k} \vec{r})$ нелинейность приводит к последовательному возбуждению временных гармоник волны:

$$U_n = A_n \sin(n\omega t - \vec{k}_n \vec{r}_n), \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

Обогащение частотного спектра отраженного акустического сигнала означает искажение формы синусоидального профиля волны.

Параметр $A/A_{\text{хар}}$ характеризует локальную нелинейность среды и указывает порядок относительного нелинейного изменения амплитуд полей за

период T колебаний. Если за время t совершается N колебаний, то нелинейный эффект увеличивается в N раз, он составит $NA/A_{\text{хар}}$.

Так как акустические волны распространяются со скоростью c , то время t определяется длиной области взаимодействия гармоник, или протяженностью l нелинейной среды: $t = l/c$, при этом $N = l/\lambda$. Поэтому если даже коэффициент локальной нелинейности мал ($A/A_{\text{хар}} < 1$), то суммарный нелинейный эффект может быть значителен ввиду большой протяженности зоны взаимодействия.

Протяженность области эффективного взаимодействия гармоник во многом зависит от дисперсии и диссипации акустических сигналов в данной среде [2]. Энергообмен между гармониками зависит от соотношения фаз. В среде без частотной дисперсии все волны распространяются с одинаковыми скоростями, и фазовые соотношения сохраняются в процессе распространения между всеми гармониками (условие фазового синхронизма) [4, 5]. Если затухание мало, то нелинейные эффекты могут накапливаться пропорционально пройденному расстоянию. Следовательно, в средах с недиспергируемыми и недиссипативными свойствами на достаточно больших длинах всегда возникают сильные нелинейные искажения исходного профиля волны. В частности, гармоническая волна может трансформироваться в разрывную ударную волну [6], что наиболее характерно для акустических волн, распространяющихся в средах с реологическими свойствами. Это всегда необходимо иметь в виду при разработке акустических вибропреобразователей и глушителей в машиностроительных конструкциях.

В случае среды с дисперсией фазовые скорости волн на разных частотах разные, поэтому фазовые соотношения между гармониками изменяются в пространстве быстро. Отличительной чертой нелинейного распространения волнового пучка является асимметрия формы возмущения: периодический сигнал искажается несимметрично, фаза сжатия сокращается по длительности, а фаза разрежения растягивается. Сокращение фазы сжатия при равенстве площадей полупериодов приводит к тому, что пиковое значение положительного возмущения больше отрицательного [7]. Нелинейность изменяет акустическое поле проходящей через препятствие волны: она сглаживает осцилляции амплитуды на оси в ближней зоне, наблюдаемые в однородных пучках с резко выраженной границей.

При расчетах полей реальных излучателей необходимо учитывать и дифракционные эффекты [7].

В работе [8] предложено упрощенное уравнение для нелинейных акустических пучков с узким угловым спектром:

$$\partial^2 u / \partial \tau \partial z = (c/z)\Delta_{\perp} v + (\varepsilon/2c) \cdot \partial^2 v^2 / \partial \tau^2.$$

Здесь $\tau = t - (z/c)$ — координата движущейся системы отсчета, где z — расстояние вдоль пучка; Δ_{\perp} — поперечный лапласиан; $v = P/\rho c^2$ — относительное акустическое давление в волне, пропорциональное площади падающей волны, где P — акустическое давление, c — линейная скорость звука, ρ — плотность среды; $\varepsilon = (\gamma + 1)/2$ — параметр нелинейности среды, где $\gamma = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей.

Для гауссова пучка

$$v(z = 0) = M e^{(-r^2/a^2)} \sin \omega t,$$

где r — эффективный радиус пучка в сечении $z = 0$; a — радиус излучающего элемента.

Введем масштабы нелинейности L_N и дифракции L_D . Значимость того или иного масштаба учитывается локальным соотношением масштабов:

$$N = L_N/L_D = N(z = 0) = (1/2\pi\varepsilon M)(\lambda/d)^2.$$

В случае плоского гармонического излучателя, параметры которого удовлетворяют выражению $N_0 = (2/\pi\varepsilon M)(\lambda/d)^2$, где d — диаметр излучателя, в дальней зоне падает амплитуда волны и происходит расширение пучка так, что параметр N меняется по закону

$$N = d^2 N_0 / (\pi \lambda R). \quad (1)$$

Следовательно, расстояние, являющееся границей дифракционной зоны, определяется выражением

$$R_s \approx N_0 d^2 / (\pi \lambda).$$

Нелинейное затухание, обусловленное разрывами, проявляется значительно в тех направлениях, где поле максимально, что приводит к расширению с расстоянием углового распределения поля, когда ультразвуковой луч из прожекторной зоны переходит в сферическую зону.

До тех пор пока не проявляется нелинейное затухание, параметр N меняется с расстоянием от излучающего преобразователя согласно формуле (1), из которой можно получить размер переходной области, где R_s меняется от больших значений до малых.

Частные случаи распространения и отражения акустических волн в вязких средах рассмотрены в работах [9—12].

При движении среды, в которой распространяются акустические сигналы, процессы усложняются. В общем случае очень трудно отделить акустические процессы от сугубо нелинейных процессов, имеющих место в движущейся среде [7, 8]. Возможны также искажения фазовых скоростей из-за турбулентности перемещающихся потоков в реологических средах.

Таким образом, учитывая нелинейность, в основном, реологических сред можно разработать более совершенные системы измерения параметров движения энергетических комплексов [11].

Поскольку фрагменты нелинейности среды присутствуют всегда при акустическом зондировании любых энергетических установок, излучатели и приемники ультразвуковых волн целесообразно располагать в прожекторной зоне на минимальном расстоянии от исследуемого объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Волны** и структуры в нелинейных средах без дисперсии: Приложения к нелинейной акустике / С. Н. Гурбатов, О. В. Руденко, А. И. Саичев. М.: Физматлит, 2008. 495 с.
2. **Ерофеев В. И.** О некоторых факторах, влияющих на эффект модуляции звука динамическим полем деформаций // Акустический журнал. 1995. Т. 41. № 6. С. 897—901.
3. **Заболотская Е. А., Хохлов Р. В.** Квазиплоские волны в нелинейной акустике ограниченных пучков // Акустический журнал. 1969. Т. XV. № 1. С. 40—47.
4. **Гордеев Б. А., Золин В. В., Беленова Н. А.** Особенности использования ультразвукового фазового метода в задачах виброметрии // Метрология. 1986. № 10. С. 41—45.
5. **Гордеев Б. А., Родюшкин В. М.** Модуляционные методы измерения при исследовании акустических характеристик машин // Тез. докл. Всесоюз. совещ. "Проблема улучшения акустических характеристик машин". М., 1988. С. 114—115.
6. **Гордеев Б. А., Синев А. В.** Влияние частотной модуляции отраженного акустического сигнала на погрешность ультразвукового вибропреобразователя // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000. № 5. С. 18—21.
7. **Влияние** эффекта Доплера на погрешность измерения вибрации электромеханических комплексов волновыми методами / Б. А. Гордеев, С. Н. Охулков, А. Н. Осмехин, А. С. Плехов // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2017. № 2. С. 56—61.
8. **Григорьева Н. С.** Влияние движения источников на фазовые характеристики волны, отразившейся от произвольной поверхности // Акустический журнал. 1988. Т. XXXIV. № 1. № 1. С. 64—67.
9. **Гордеев Б. А., Леонтьева А. В.** Измерение радиальных вибраций шнековых валов волновыми методами // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 34.
10. **Гордеев Б. А., Куклина И. Г.** Определение дисбаланса жестких роторов дорожных машин акустическими методами // Строительные и дорожные машины. 2010. № 2. С. 32—35.
11. **Пат. 2472109 Рос. Федерации.** Ультразвуковой фазовый вибропреобразователь.
12. **Гордеев Б. А.** Методические погрешности при измерениях параметров вибрации строительных конструкций волновыми методами // Гордеев Б. А., Ерофеев В. И., Мониц Д. В., Гребнев П. А. // Метрология. 2015. № 2. С. 36—47.

А. В. КОСМЫНИН, д-р техн. наук, В. С. ЩЕТИНИН, д-р техн. наук, А. В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, А. С. ХВОСТИКОВ, канд. техн. наук, Б. Н. МАРЬИН, д-р техн. наук (Комсомольский-на-Амуре государственный университет), С. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук (ООО "ТОРЭКС-Хабаровск", Комсомольск-на-Амуре), e-mail: avkosm@knastu.ru

Шпиндельный узел с регулируемыми выходными характеристиками

Предложен способ управления выходными характеристиками шпиндельных узлов на основании использования конусных газовых подшипников с малым углом конусности. Описана экспериментальная установка для исследования эксплуатационных показателей данных подшипников. Приведены результаты исследований газостатических опор с малым углом конусности.

Ключевые слова: шпиндельный узел, газостатическая опора, малый угол конусности, эксперимент.

A method for controlling the output characteristics of spindle assemblies based on the use of tapered gas bearings with a small taper angle is proposed. An experimental bench for studying the performance characteristics of these bearings is described. The results of researches of gas-static bearings with a small taper angle are presented.

Keywords: spindle assembly, gas-static support, small taper angle, experiment.

Для современного станкостроения характерна реализация больших частот вращения шпинделей. Обеспечить высокую быстроходность шпиндельного узла (ШУ) нетяжело нагруженных узлов металлообрабатывающих станков способны бесконтактные газостатические опоры. Газовые подшипники могут развивать быстроходность шпинделей порядка $200\,000\text{ мин}^{-1}$ и обеспечивают их точность вращения до $0,2\text{ мкм}$ [1, 2]. Такие опоры имеют сравнительно длительный межремонтный период.

За исключением довольно сложной струйной системы управления у газостатических подшипников практически отсутствует эффективное регулирование их эксплуатационных характеристик. Требуемые характеристики опоры закладываются еще на этапе ее проектирования. Следует отметить, что известны управляемые газоманитные опоры шпиндельных узлов, которые позволяют решить данную проблему путем управления магнитными силами [3], но такие ШУ с газоманитными опорами сложны в изготовлении и эксплуатации.

В работе [1] выполнен анализ газостатических опор, из которого следует, что опоры с частично пористыми питателями имеют лучшие нагрузочные и жесткостные характеристики, чем опоры, имеющие дроссельные ограничители расхода.

В работе [2] представлены результаты численных исследований таких опор. Результаты экспери-

ментальных исследований характеристик газостатических опор с частично пористой стенкой вкладыша, изложенные в работе [4] для различных значений среднего радиального зазора, подтвердили результаты численных исследований. Это позволило сделать вывод, что с ростом среднего радиального зазора несущая способность подшипника проходит через максимум, при котором не обеспечивается реально достижимая высокая жесткость смазочного слоя. Следовательно, шпиндель способен воспринимать сравнительно высокие радиальные силы резания, которые наблюдаются, например, на получистовых и черновых технологических операциях. С увеличением среднего радиального зазора жесткость возрастает, что положительно сказывается на точности вращения шпинделя и, следовательно, на точности обработки, но при этом заметно снижается грузоподъемность газостатической опоры.

Из сказанного выше можно заключить, что изменение среднего радиального зазора опоры позволяет решить задачу регулирования эксплуатационных характеристик как самой опоры, так и выходных характеристик ШУ. Шпиндельный узел с регулируемым средним радиальным зазором газовой опоры позволит выполнять операции обработки материалов как с повышенными нагрузками и меньшей точностью на предварительных операциях, так и с повышенной точностью вращения инструмента путем повышения жесткости на финишных операциях обработки материала.

Для управления средним радиальным зазором газостатического подшипника ШУ предлагается использовать опоры с малой конусностью и возможностью осевого перемещения вала и вкладыша относительно друг друга. Конструкция такой опоры представлена на рис. 1.

Заметим, что малый угол конусности газостатической опоры не ведет к заметному снижению ее грузоподъемности и жесткости по сравнению с цилиндрическим газовым подшипником с внешним наддувом. Осевое смещение вкладыша конусной опоры относительно вала на $1/10$ длины позволяет изменить средний радиальный зазор в 2–3 раза, при этом изменение среднего диаметра составляет не более 1 %.

В работах [1, 3] подробно описаны методики расчета характеристик бесконтактных опор, представлены конструкции экспериментальных стен-

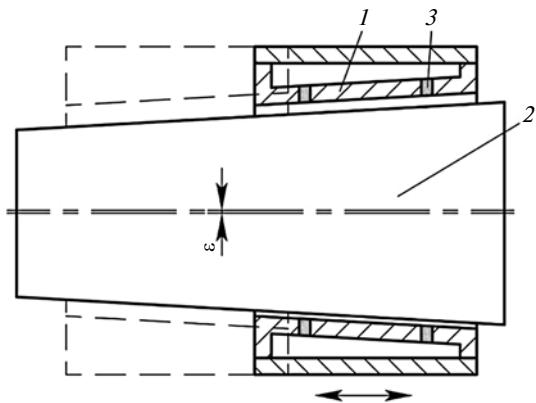


Рис. 1. Конструкция газостатической опоры с малой конусностью: 1 — вкладыш подшипника; 2 — шип; 3 — питатель

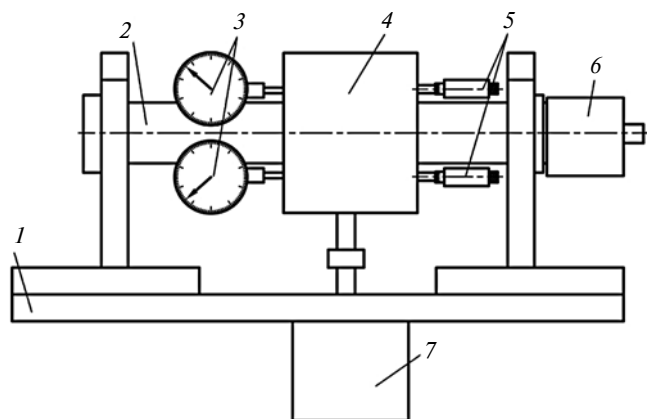


Рис. 2. Схема станда для испытаний газостатической опоры малой конусности

дов, а также методики проведения экспериментальных исследований.

Для проведения исследований конусной опоры с регулируемым зазором разработан узел станда, позволяющий осуществлять относительное осевое перемещение опоры и вала с контролем этого перемещения (рис. 2).

Осевое перемещение опоры 4 относительно вала 2 осуществляется с помощью микрометрических головок 5. Контроль этого перемещения проводится с помощью индикаторов 3 часового типа. Регулировочный винт и индикатор жестко соединены с рамой 1. Нагрузочное устройство 7 поршневого типа предназначено для радиального смещения вала, который приводится во вращение турбоприводом 6.

С помощью разработанного станда выполнен комплекс экспериментальных исследований по установлению влияния среднего радиального зазора конусной опоры на ее грузоподъемность и жесткость. Результаты исследований при среднем диаметре $d = 50$ мм, длине вкладыша $L = 60$ мм, абсолютном давлении наддува воздуха $p = 6$ ата, относительном эксцентриситете $e = 0,6$ и частоте вращения вала $n = 22\ 000$ мин⁻¹ представлены на рис. 3.

Согласно рис. 3 в исследуемом диапазоне изменения среднего радиального зазора C грузоподъемность Q опоры имеет ярко выраженный максимум, при котором жесткость S не достигает своих высоких значений. С увеличением среднего радиального зазора грузоподъемность газовой опоры несколько уменьшается, а жесткость заметно возрастает. В целом установленные зависимости эксплуатационных характеристик газостатической опоры с малой конусностью подтвердили сделанное выше предположение о возможности регулирования режима ее работы путем изменения среднего радиального зазора.

Таким образом, использование регулируемых газостатических опор в ШУ станков позволяет регулировать выходные нагрузочные и жесткостные характеристики станка, измеренные на режущем инструменте.

Представляется целесообразным использование таких ШУ в станках шлифовальной группы, которые на предварительных технологических операциях шлифования могут обеспечить повышенные нагрузки с меньшей точностью обработки, а на финишных операциях, где силы резания незначительны, обеспечить точность обработки.

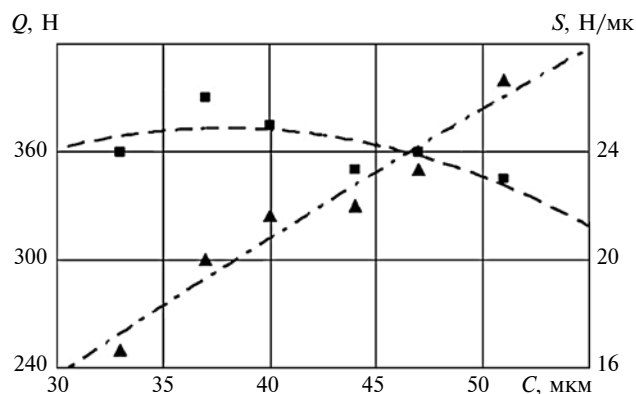


Рис. 3. Зависимости грузоподъемности Q и жесткости S от среднего радиального зазора C :

■, ---- — грузоподъемность: эксперимент и теория; ▲, - - - - — жесткость: эксперимент и теория

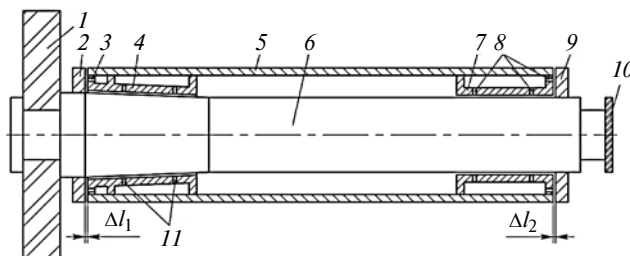


Рис. 4. ШУ с конической газостатической опорой:

1 — режущий инструмент; 2 — передний упорный подшипник; 3, 8, 11 — питатели; 4 — конический газовый подшипник; 5 — корпус; 6 — шпиндель; 7 — радиальный газостатический подшипник; 9 — задний упорный подшипник; 10 — привод шпинделя

С. И. ДОСЬКО, канд. техн. наук, В. М. УТЕНКОВ, д-р техн. наук, А. А. МОЛЧАНОВ, канд. техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: alexandrmolchanov@inbox.ru

Спектральный анализ в исследовании и диагностике станков

Рассматривается применение классического и параметрического спектрального анализа при мониторинге состояния промышленного оборудования и, в частности, металлорежущих станков. Представлен анализ эффектов, связанных с подготовкой исходных данных и алгоритмом их обработки, накладывающие существенные ограничения на применение классического спектрального анализа. Дано сравнение параметрических методов спектрального анализа на основе авторегрессионных методов.

Ключевые слова: спектральный анализ, диагностика, разрешающая способность, спектральная плотность, экспоненциальный анализ Прони.

The application of classical and parametric spectral analyzes in monitoring the condition of industrial equipment and, in particular, metal-cutting machines is considered. An analysis of the effects associated with the preparation of the initial data and the algorithm for their processing, which impose significant restrictions on the use of classical spectral analysis, is presented. Comparison of parametric methods of spectral analysis based on autoregressive methods is given.

Keywords: spectral analysis, diagnostics, resolution capability, spectral density, Prony's exponential analysis.

Динамические процессы в металлорежущих станках значительно влияют на точность и шероховатость обработанных поверхностей и производительность обработки. Поэтому актуальной задачей остается мониторинг состояния основных исполнительных узлов металлорежущих станков,

которая сегодня решается с помощью современных методов диагностики и позволяет оценивать остаточный ресурс станков и прогнозировать сроки их технического обслуживания.

Информация о состоянии системы содержится в экспериментальном сигнале (функция времени), т. е. представляет собой временной ряд. В основу современных систем мониторинга и диагностики оборудования положен метод спектрального анализа [1]. В отечественном станкостроении компьютерные методы спектрального анализа получили свое развитие в работах [1, 2], выполненных в 70—80 гг. прошлого века. В настоящее время по известным причинам исследования, как правило, не дотягивают до прежнего уровня и в лучшем случае повторяют достигнутое [3].

Спектральный анализ (СА) является одним из методов линейной обработки стационарных временных рядов и позволяет определить частотный состав измеряемого сигнала, а также распределение энергии по частотам колебаний, т. е. спектральную плотность или спектр мощности. Математической основой, связывающей временной сигнал с его представлением в частотной области, является преобразование Фурье [4, 5]. При вычислении преобразования Фурье временного сигнала возможно появление нескольких эффектов, которые накладывают соответствующие ограничения на применение классического СА и могут быть связаны как с подготовкой исходных данных, так и с алгоритмом их обработки.



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 21)

Основываясь на полученных результатах, в Комсомольском-на-Амуре государственном университете разработали конструкцию ШУ с управляемой передней газостатической опорой (рис. 4), на которую получен патент РФ [5].

Управление осевым перемещением шпинделя относительно конического вкладыша осуществляется путем изменения давления газа, подаваемого на передний упорный подшипник. Использование изобретения позволяет заметно упростить процесс управления выходными характеристиками ШУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Космынин А. В., Шаломов В. И., Щетинин В. С. и др.** Выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах. М.: Издательский дом "Академия Естествознания", 2011. 177 с.

2. **Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Часть 1. Эксплуатационные характеристики опор с внешним наддувом газа / А. В. Космынин, А. В. Смирнов, А. С. Хвостиков, Н. А. Иванова.** Комсомольск н/А: ФГБОУ ВПО "КНАГТУ", 2014. 303 с.

3. **Космынин А. В., Щетинин В. С., Иванова Н. А.** Применение новых газомангнитных опор в шпиндельных узлах для высокоскоростной обработки деталей машин // Вестник КНАГТУ: Вып. 13. Ч. 1: Сб. науч. тр. Комсомольск н/А. 2009. С. 180—182.

4. **Космынин А. В., Виноградов С. В., Виноградов В. С. и др.** Частично пористые газостатические опоры шпиндельных узлов. Теория и эксперимент. М.: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2011. 126 с.

5. **Пат. 2641942 Рос. Федерации:** МПК В23Q1/38, В23В19/02, В24В41/04. Способ управления выходными характеристиками ротора в виде его несущей способности и жесткости.

Эффект подмены частот (aliasing) возникает при недостаточной частоте выборки (дискретизации) сигнала, характеризуемого изучаемый процесс, когда в сигнале присутствуют гармоники с частотами, превышающими удвоенную частоту дискретизации (теорема Котельникова—Шеннона [1, 6]). Решить данную проблему можно приведением в соответствие с теоремой Котельникова частоты дискретизации и использованием специальных фильтров.

Эффект просачивания частот (leakage) появляется из-за ограниченного интервала наблюдений за сигналом, что эквивалентно умножению его на некоторую функцию окна [4, 5]. Это приводит к искажению спектра и просачиванию реальной мощности в другие частотные интервалы спектра. Некоторое уменьшение влияния данного эффекта достигается увеличением интервала наблюдений, дополнением значений временного интервала выборки нулями или применением предварительного сглаживания краев ряда подходящей функцией окна.

Точное поведение спектра можно получить только на дискретных частотах, вычисленных с помощью преобразования Фурье, что напоминает наблюдение через узкие бойницы (picket-fence).

Эффект Гиббса, или эффект возникновения паразитных гармоник, наиболее заметных вблизи самых мощных, проявляется в тех случаях, если в сигнале есть разрыв, а также при конечном интервале наблюдений [4, 5].

Так как результаты спектральных оценок существенно зависят от принятой модели данных, различают непараметрические и параметрические спектральные оценки. На непараметрической оценке базируется классический спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье. Для повышения качества спектральных оценок в классическом спектральном анализе используют их усреднение или сглаживание с помощью разных окон [1, 4—8]. Для непараметрических оценок используют только последовательность измерений. Для параметрических оценок используют также некоторые априорные предположения, например, предполагают, что можно использовать авторегрессионную модель p -го порядка [краткое обозначение — $AR(p)$].

Разрешающая способность в частотной области и принцип неопределенности

Разрешающую способность спектральных методов можно оценить на основании так называемого принципа неопределенности [5, 8]. Допустим, что основная энергия сигнала сосредоточена в интервале времени ΔT . Общий принцип неопределенности состоит в том, что для любой функции интервал ΔT и диапазон (полоса) частот Δf связаны выражением [6, 8]

$$\Delta T \Delta f \geq 1. \quad (1)$$

Если время регистрации сигнала составляет T , то в соответствии с принципом неопределенности (1) разрешающая способность классических оценок спектральной плотности оценивается как $B_e \approx 1/T$, т. е. обратно пропорциональна времени наблюдения. При реальном вычислении преобразования Фурье, при котором временной сигнал содержит N значений с интервалом выборки $\Delta t (\Delta T = N\Delta t)$, дополняемые нулями, интервал в частотной области составит:

$$b_f = \frac{1}{2\Delta T} = \frac{1}{2N\Delta t} = \frac{S}{2N} = \frac{F}{N},$$

где S — скорость выборки ($S = 1/\Delta t$); F — частота Найквиста.

После фильтрации последовательность значений частотной характеристики определяется в частотах, разделенных интервалом b_f , а с учетом повторяемости значений частоты разделяются интервалом

$$b_f^* = 2b_f = \frac{F}{N} = \frac{2F}{N}.$$

Параметрические методы оценки спектральной плотности дают более высокое разрешение [9, 11], а их стабилизация обеспечивается привлечением дополнительной априорной информации.

Рассмотрим характеристики авторегрессионных методов спектрального анализа.

Метод Юла-Уокера. Достоинства: хорошие результаты при анализе данных сигналов; гарантированная стабильность рассчитанного формирующего фильтра. Недостатки: низкие результаты при анализе коротких сигналов; при анализе суммы синусоид с шумом имеют место смещенные спектральные пики.

Метод Берга. Достоинства: высокая разрешающая способность при анализе коротких сигналов; гарантированная стабильность рассчитанного формирующего фильтра; минимизирует ошибки предсказания вперед и назад. Недостатки: положения спектральных пиков значительно зависят от начальных фаз синусоид; при большом порядке модели возможно расщепление спектральных пиков; при анализе суммы синусоид с шумом имеют место смещенные спектральные пики.

Ковариационный метод. Достоинства: большая (по сравнению с методом Юла-Уокера) разрешающая способность при анализе коротких сигналов; возможность оценки частот для сигнала, представляющего собой сумму "чистых" синусоид. Недостатки: рассчитанный формирующий фильтр может оказаться нестабильным; при анализе суммы синусоид с шумом имеют место смещенные спектральные пики.

Модифицированный ковариационный метод. Достоинства: высокая разрешающая способность при анализе коротких сигналов; возможность оценки частот для сигнала, представляющего собой сумму "чистых" синусоид; отсутствие расщепления спектральных пиков; минимизирует ошибки предсказания вперед и назад. Недостатки: положения спектральных пиков могут зависеть от начальных фаз синусоид; рассчитанный формирующий фильтр может оказаться нестабильным; при анализе суммы синусоид с шумом получаются слегка смещенные спектральные пики.

Спектральная плотность является одним из основных инструментов анализа сигналов, поступающих от вибродатчиков, и успешно используется при вибродиагностике машин. Спектральную плотность рассчитывают с помощью алгоритма дискретного преобразования Фурье (например, быстрого преобразования Фурье), реализованного в специальном процессоре. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) сигнала $x(t)$, регистрируемого в N равноотстоящих точках с временным интервалом Δt , определяет выражение [4—6, 8]

$$X(f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi f n \Delta t},$$

где $0 < t < T$; $T = N\Delta t$.

Несглаженные оценки спектральной плотности рассчитывают по формуле

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N\Delta t} [X^*(f)X(f)],$$

где $X^*(f)$ — величина, комплексно сопряженная с $X(f)$.

Для минимизации просачивания в спектральных оценках из-за ограничения длины временного ряда оценки, как правило, сглаживают, например, с помощью спектрального окна Хэннинга [4, 5].

Недостатком данного метода расчета спектральной плотности является эффект "просачивания", вызываемый ограниченной длиной записи временного ряда. Для его устранения применяют весовые функции, описывающие спектральные окна [4, 5, 8], не зависящие от статистических свойств анализируемых сигналов. Эффект просачивания приобретает особое значение для коротких записей данных.

В методе максимальной энтропии (ММЭ) оценки спектральной плотности рассчитывают с помощью алгоритма Берга [6] после построения авторегрессионного фильтра ошибки предсказания (ФОП):

$$S_{xx}(f) = \frac{P_M}{2f_s \left[1 + \sum_{m=1}^M a_m \exp(-j2\pi m f \Delta t) \right]^2}.$$

Данное выражение выведено путем максимизации энтропии сигнала (меры содержания информации) или, точнее, производных энтропии по элементам расширения автокорреляционной функции $R_{xx}(m)$, $|m| \geq M + 1$, здесь P_M — остаточная спектральная плотность авторегрессионного фильтра M -го порядка с коэффициентами a_m ; f_s — половина частоты выборки.

Коэффициенты фильтра можно вычислить с помощью рекурсивных алгоритмов наименьших квадратов и алгоритмов максимального правдоподобия [6, 8, 10, 11].

Основными отличиями спектрального ММЭ от линейного ДПФ являются зависимость от данных и нелинейность. Поэтому ММЭ не требует периодического продолжения данных или их обнуления вне пределов записи, которые применяются в методе Фурье для предотвращения просачивания. Методы ДПФ и ММЭ применены с целью сравнения к расчету спектральной плотности выхода модельной системы из двух резонансных фильтров с предельно разными собственными частотами и данных о вибрации фильерного узла в процессе экструзии проволоки.

Результаты проверки на модельной системе

Перед анализом вибрационного сигнала, регистрируемого на экструзионной фильере, методы ДПФ и ММЭ были применены к временному ряду, генерируемому на выходе модельной системы, чтобы выявить возможные трудности с разрешением по частоте, сдвигом частот и спектральной неустойчивостью. Значения x_k получали пропусканием псевдослучайного бинарного шума W_k через два резонансных цифровых фильтра с уравнением [10]

$$x_k = 2\alpha \cos(2\pi f_0) x_{k-1} - \alpha^2 x_{k-2} + (1 - \alpha)(1 + \alpha) W_k - \alpha(1 - \alpha)(1 + \alpha) \cos(2\pi f_0) W_{k-1},$$

где $\alpha = 0,99$; $f_0 = 0,25$ и $0,27$ Гц — собственные частоты.

Псевдослучайные бинарные входные шумы не коррелированы, а выходы суммируются и дают искомый временной ряд. Запись данных содержала 2500 точек, из которых для анализа были выбраны 60 и 180 точек (рис. 1—3).

В статье [10] отмечается, что ММЭ не дает явного преимущества в повышении разрешающей способности по частоте, но параметризация позволяет получить гладкие кривые спектральной плотности с более узкими резонансными пиками.

В работе [11] дано описание трех параметрических методов идентификации, дополняющих методы преобразования Фурье (МПФ). Рассмотрены три метода: метод Прони, рекуррентная процедура метода наименьших квадратов (РМК) и

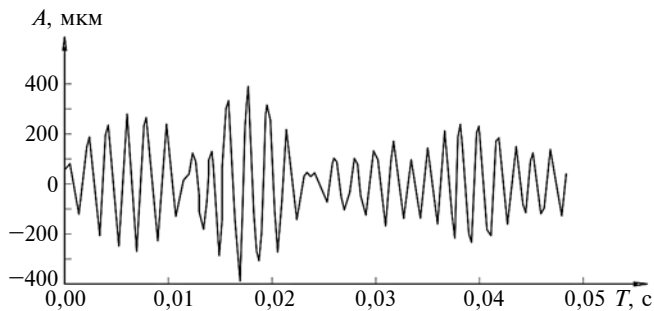


Рис. 1. Временной ряд для модельной системы (180 точек)

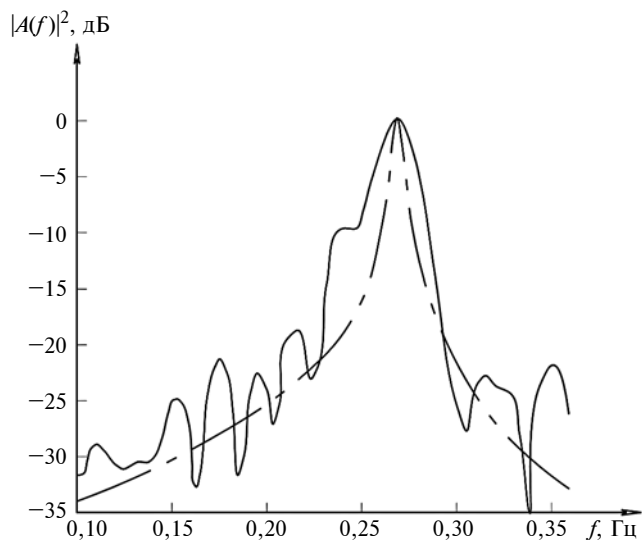


Рис. 2. Спектральная плотность, рассчитанная методами ДПФ (.....) и ММЭ с четырьмя коэффициентами фильтра (—) по 60 точкам модельных данных

метод инструментальных переменных (МИП). Метод Прони предусматривает аппроксимацию экспериментально наблюдаемых временных процессов комплексными экспонентами, поэтому его можно использовать для анализа процессов, замеренных при воздействии нестационарных возмущений в системе, а также для анализа периодических и почти периодических процессов [11]. Два других метода предусматривают представление вынужденных колебаний системы в виде взвешенной суммы значений колебательного процесса в текущий и прошедшие моменты времени.

Если $y(n)$ и $u(n)$ — квантованные во времени (синхронные) сигналы соответственно вынужденных колебаний и внешнего возбуждения, то оценку $\hat{y}(n)$ процесса $y(n)$ можно представить как

$$\hat{y}(n) = a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_N y(n-N) + b_0 u(n) + b_1 u(n-1) + \dots + a_M u(n-M),$$

где N и M — порядки соответственно авторегрессии и скользящего среднего.

Аппроксимационная модель, в рамках которой строится описание экспериментальных данных, имеет вид:

$$Y(z) = H(z)U(z).$$

Здесь $Y(z)$, $U(z)$ и $H(z)$ — преобразования квантованных во времени соответственно выходного процесса, процесса на входе и импульсной переходной функции (ИПФ):

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_N z^{-N}}.$$

Коэффициенты a_i и b_i можно связать с физическими параметрами системы, например, для колебательной системы с ИПФ:

$$h(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi).$$

Если квантование во времени осуществляется с шагом Δt , имеем:

$$H(z) = \frac{A \sin \varphi + A e^{-\delta \Delta t} \sin(\omega \Delta t - \varphi) z^{-1}}{1 - 2 e^{-\delta \Delta t} \cos(\omega \Delta t) z^{-1} + e^{-2 \delta \Delta t} z^{-2}}.$$

Видно, что физические параметры системы A , ω , δ и φ непосредственно можно связать с b_1 , b_2 и a_1 , a_2 , что иллюстрирует переход от непрерывного к дискретному времени.

Также выполнено сравнение метода Прони, РМНК и МИП с МПФ при анализе сигналов простой балочной конструкции. Результаты анализа методом Фурье в одном из вариантов оказались неточными из-за плохой разрешающей способности по частоте $\approx 1,9$ Гц, когда спектральные плотности оценивали с использованием 1024 точек при частоте оцифровки временных сигналов 2000 Гц.

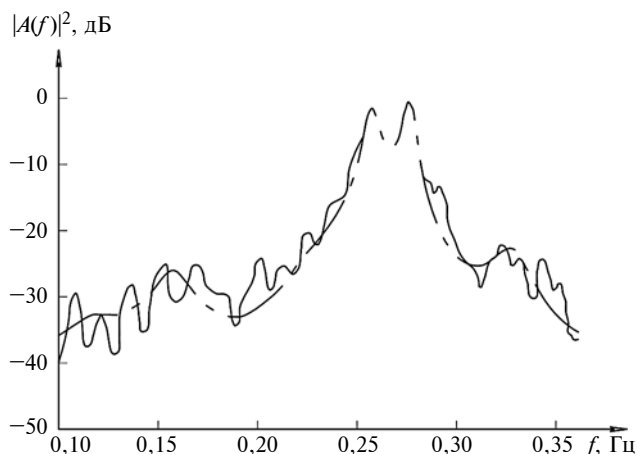


Рис. 3. Спектральная плотность, рассчитанная методами ДПФ (.....) и ММЭ с 21 коэффициентом фильтра (—) по 180 точкам модельных данных

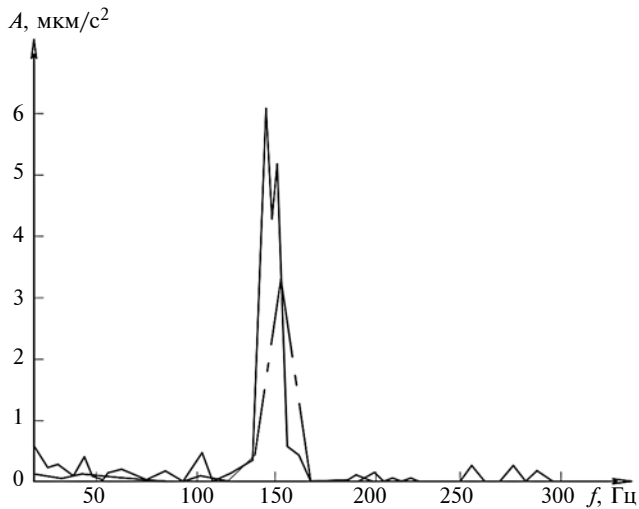


Рис. 4. АЧХ по ускорению токарного станка

В работе [1] для вычисления коэффициентов ряда Фурье с

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \cos \omega_k \tau d\tau; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \sin \omega_k \tau d\tau,$$

$$k = 1, 2, \dots$$

предложено функции $\cos \omega_k t$ и $\sin \omega_k t$ рассматривать в качестве весовых множителей и приближать многочленом только функцию $f(t)$.

Для тестового примера, представляющего собой систему борштанга—гаситель, получены следующие результаты: при небольшой погрешности оценивания ФЧХ (<0,2 %) погрешность оценивания АЧХ составила >7 % в окрестности резонансной частоты.

В работе [13] приводится пример использования параметрического спектрального анализа (ARspectraanalysis) для повышения разрешающей способности в частотной области и его сравнение с классическим преобразованием Фурье.

На рис. 4 представлены АЧХ, полученные при обработке результатов ударных испытаний на токарном станке двумя методами: преобразование Фурье (FFT) и методом скользящего среднего (ARMA). Графики существенно образом отличаются друг от друга: во-первых, метод ARMA, обладающий гораздо большей разрешающей способностью, позволил уловить расщепление пика, что указывает на наличие близких собственных частот; во-вторых, максимальные значения отличаются почти в 2 раза, а частоты, соответствующие максимумам, отличаются почти на 10 %.

Использование параметрических методов связано с необходимостью располагать некоторой априорной информацией о поведении системы при воздействии возмущающего сигнала для аппроксима-

ции экспериментальных данных в рамках модели подходящей структуры.

Если модель соответствует механизму формирования экспериментально наблюдаемых процессов, то эти методы можно применять и при сравнительно коротких реализациях наблюдаемых процессов. В некоторых случаях они позволяют легко определить параметры собственных форм колебаний системы — собственные частоты, коэффициенты демпфирования и т. д.

В сравнении с распространенными методами спектрального анализа сигналов, основанных на преобразовании Фурье, метод экспоненциального анализа Прони обладает рядом существенных преимуществ, в частности, отсутствует принципиальное ограничение на разрешение по частоте. Следовательно, данный метод применим для анализа коротких сигналов с высоким коэффициентом затухания и позволяет существенно повысить точность оценки значений частот, присутствующих в сигнале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
2. Лукьянов В. П. Исследование вынужденных колебаний металлорежущих станков спектральным методом: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1975. 236 с.
3. Св-во о гос. рег. 2015610599 программы для ЭВМ: Программный комплекс обработки и анализа вибрационных сигналов ExpDynaPro.
4. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1971, 1972. Т. 2.
5. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов: Основные методы / пер. с англ. В. И. Хохлова. М.: Мир, 1982. 428 с.
6. Берг Дж. П., Берг Дж. П., Люндбергер Д. Г., Венгер Д. Л. Оценивание ковариационных матриц с заданной структурой. ТИИЭР, 1982. Т. 70. № 9. С. 63—77.
7. Котельников В. А. Радиофизика, информатика, телекоммуникации. Сб. Тр. Т. 1. М.: ФИЗМАТГИЗ, 2008. 520 с.
8. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.
9. Терещих В. Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
10. Ромберг Т., Кассар А., Харрис Р. Сравнение традиционного метода Фурье с методом максимальной энтропии в спектральном анализе вибраций // Конструирование и технология машиностроения. 1984. Т. 106. № 1. С. 34—37.
11. Девис П., Хэммонд Дж. К. Сравнение метода преобразования Фурье и параметрических методов идентификации конструкций // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Сер. В. 1984. № 1. С. 38—48.
12. Курочкин К. Н. Особенности оценивания динамических характеристик технических систем // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 1 (5). С. 114—116.
13. Archenti A. A. Computational Framework for Control Machining System Capability KTN Royal institute of Technology. Stockholm: 2011. 97 p.

В. П. ЛЯЛЯКИН, д-р техн. наук (Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ), Д. Б. СЛИНКО, канд. техн. наук (Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана), e-mail: valpal-1938@mail.ru

Ускоренный метод Локати для испытания деталей машин на сопротивление усталости

Приведены результаты испытаний образцов и деталей машин на сопротивление усталости по стандартной методике с построением кривой Велера и определением предела выносливости и по ускоренной методике с определением предела выносливости. В качестве ускоренного метода испытаний использован метод ступенчато-возрастающих нагрузок (метод Локати), в качестве условных кривых усталости — наклонные кривые усталости, параллельные наклонным кривым усталости, полученным при стандартных испытаниях образцов с построением кривой Велера. Для всех условных кривых принята одинаковая точка перегиба кривой усталости в полулогарифмических координатах.

Ключевые слова: сопротивление усталости, предел выносливости, кривая Велера, ускоренные испытания.

The results of testing specimens and machine parts for fatigue resistance according to the standard method with the construction of the Wöhler curve and the determination of the endurance limit and the accelerated method with the determination of the endurance limit are presented. As an accelerated test method, the method of step-increasing loads (the Locati method) was used, as the conditional fatigue curves — oblique fatigue curves parallel to the oblique fatigue curves obtained during standard tests of specimens with the construction of the Wöhler curve. For all conventional curves, the same inflection point of the fatigue curve in semilogarithmic coordinates was taken.

Keywords: fatigue resistance, endurance limit, Wöhler curve, accelerated tests.

Основными показателями качественного восстановления изношенных деталей являются износостойкость и прочность при переменных нагрузках (сопротивление усталости).

Вопросам оценки эффективности восстановления деталей тракторов и сельскохозяйственных машин в настоящее время уделяется большое внимание. Однако испытания деталей на сопротивление усталости стандартным методом с построением кривой Велера весьма длительны. Так, например, испытания серии коленчатых валов (6—8 образцов) на машине УМ-4 занимают около 25—30 производственных смен. Поэтому большое значение приобретают ускоренные методы испытаний на сопротивление усталости.

Цель исследования — оценить ускоренный метод Локати. В литературных источниках приведено

сравнительно много методов ускоренных испытаний. Наличие множества методов можно объяснить недостаточной теоретической разработкой проблемы сопротивления усталости [1—4].

Для определения сопротивления усталости был использован метод ступенчато-возрастающих нагрузок (метод Локати). Данный метод основан на гипотезе линейного накопления повреждений, согласно которой разрушения образца начинаются тогда, когда сумма относительных повреждений, накопленных на разных ступенях нагружения, достигает единицы, т. е.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

где N_i — число циклов нагружения, необходимое для разрушения изделия при напряжениях σ_i ; n_i — число циклов нагружения деталей при уровне напряжения σ_i .

По методу Локати изделие подвергается нагружению, увеличивающемуся на каждой ступени так, что отношение прироста напряжения на одной ступени к числу циклов остается постоянным. Нагрузку увеличивали вплоть до разрушения образца.

Испытания проводились на усталостной машине УМ-4 при нагружении знакопеременным изгибающим моментом.

Для изготовления образцов были использованы новые и восстановленные гладким хромированием коленчатые валы компрессора.

Таким образом получили образцы, изготовленные из стали 45 диаметром 40 мм, новые (восстановленные электроимпульсным покрытием). За критерий разрушения было принято появление в опасном сечении макротрещины длиной 8—10 мм.

Результаты исследования. Сначала были испытаны образцы по стандартной методике усталостных испытаний с целью построения кривой Велера.

В качестве условных кривых при ускоренных испытаниях были взяты кривые усталости, параллельные кривым усталости образцов, построенным с использованием классического метода. Точка перегиба в этом случае для всех кривых усталости была принята одна и та же.

Испытания восстановленных образцов начались с нагружения, которое было заведомо ниже предлагаемого предела выносливости. После накопления 100 000 циклов нагружения, нагрузка на обра-

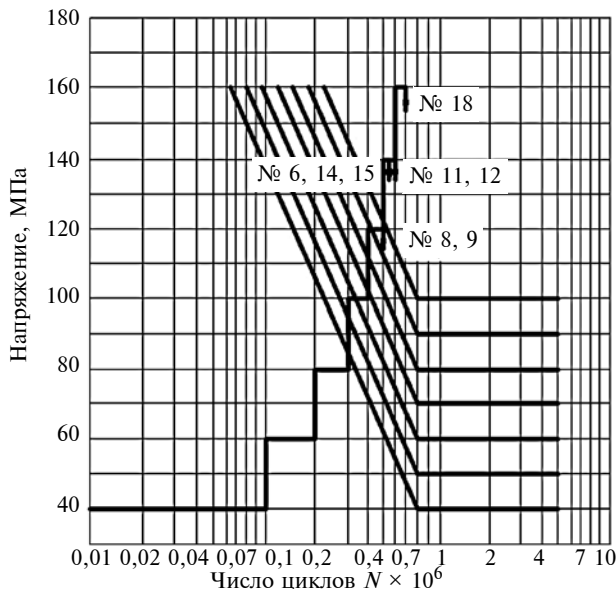


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний по методу ступенчатого нагружения:

№ 18 — новый образец; № 6 — образец восстановленный гладким хромированием; № 8, 9 — образцы, восстановленные пористым хромированием; № 11, 12 — образцы, восстановленные гладким осталиванием; № 14, 15 — образцы, восстановленные пористым осталиванием

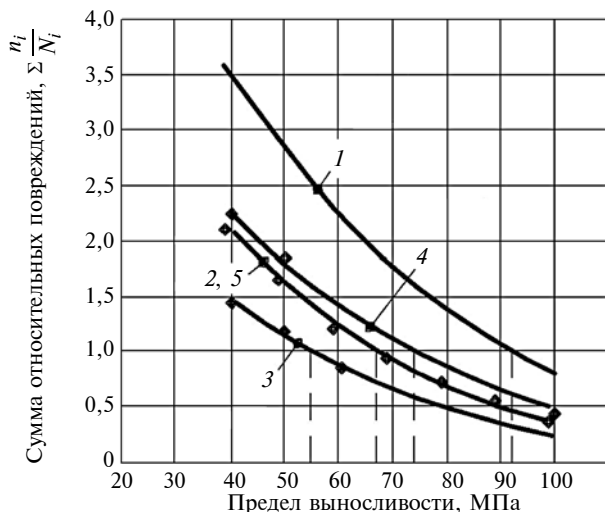


Рис. 2. График для интерполяционного определения предела выносливости:

1 — новые образцы; 2 — образец, восстановленный гладким хромированием; 3 — образцы, восстановленные пористым хромированием; 4 — образцы, восстановленные гладким осталиванием; 5 — образцы, восстановленные пористым осталиванием

зец увеличивалась на 20 МПа. На следующей ступени также накапливалось 100 000 циклов нагружения и т. д. до появления трещины усталости (рис. 1).

Из каждой серии восстановленных валов испытывалось по 2 образца. Обработка полученных результатов состояла в вычислении усталостных повреждений на каждой ступени и суммировании величины повреждений для каждой условной кривой усталости. Результаты расчетов позволяют постро-

ить зависимость суммы относительных повреждений от предела выносливости (рис. 2). Основываясь на гипотезе линейного накопления усталостных повреждений, определили предел выносливости образцов.

Результаты ускоренных усталостных испытаний указанных образцов приведены в табл. 1.

Представляло интерес оценить точность метода Локати.

Для этого были испытаны по стандартной методике с построением кривой Велера серии образцов $\varnothing 40$ мм, покрытых лентой из стали 20, новые коленчатые валы компрессора двигателя ЗИЛ-120, коленчатые валы двигателя СМД-14 в предельно изношенном состоянии [5].

Результаты испытаний этих образцов приведены в табл. 2.

Судя по результатам сравнительных испытаний, процент ошибки определения усталостной проч-

Таблица 1

Результаты ускоренных усталостных испытаний

№ п/п	Характеристика образцов	Предел выносливости σ^{-1} , МПа
1	Новые образцы коленчатого вала компрессора	90,2
2	Образцы коленчатого вала компрессора, восстановленные гладким хромированием	67,0
3	Образцы коленчатого вала компрессора, восстановленные пористым хромированием	55,0
4	Образцы коленчатого вала компрессора, восстановленные гладким осталиванием	74,0
5	Образцы коленчатого вала компрессора, восстановленные пористым осталиванием	67,0
6	Образцы из стали 45 диаметром 40 мм, покрытые лентой из стали 20	142,0
7	Коленчатые валы двигателя СМД-14 последнего ремонтного размера	115,0

Таблица 2

Результаты сравнительных испытаний

Характеристика образца	Усталостная прочность по методу Локати	Усталостная прочность по методу Велера	Процент ошибки определения прочности по методу Локати
Образцы из стали 45 диаметром 40 мм, восстановленные контактным электроимпульсным покрытием (лента из стали 20)	142	140	+1,5
Новые образцы коленчатого вала компрессора	92	90	+2,2
Предельно изношенные коленчатые валы двигателя СМД-14	115	117,5	-2,5

М. Н. ЗАХАРОВ, д-р техн. наук, М. А. ЛЮБЧЕНКО, канд. техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана),
И. В. МАГНИТСКИЙ, канд. техн. наук (АО "Композит", г. Королев Московской области), e-mail: mn@bmstu.ru

Несущая способность резьбовой пары из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов при высоких температурах

Экспериментально определена несущая способность резьбовой пары из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) со схемой армирования 4ДЛ в диапазоне температур от 20 до 2500 °С. Даны рекомендации по проектированию резьбовых соединений из УУКМ для работы при высоких температурах.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, резьбовое соединение, предельная нагрузка, несущая способность, резьбовая пара, высокая температура.

The bearing capacity of a threaded pair made of spatially reinforced carbon-carbon composite materials (CCCM) with a 4DL reinforcement scheme in the temperature range from 20 to 2500 °C is experimentally determined. Recommendations are given for the design of CCCM threaded joints for operation at high temperatures.

Keywords: carbon-carbon composite material, threaded joint, limit load, bearing capacity, threaded pair, high temperature.

В настоящее время в специальном машиностроении большое внимание уделяется разработке и совершенствованию конструкций, работающих при

совместном силовом и термическом нагружении. Необходимое усложнение конструкций связано с повышением требований к работоспособности и надежности изделий при температурах выше 2500 °С.

В России и за рубежом проведено много теоретических и экспериментальных исследований по обеспечению прочности силовых конструкций при совместном термическом и силовом нагружении. Разработаны и стандартизованы надежные методики оценки несущей способности отдельных типовых элементов конструкций при простых видах силового нагружения и теплового воздействия с учетом развития пластических деформаций, деградации материала и накопления повреждений в сечениях отдельных элементов.

Однако для силовых элементов из армированных композиционных материалов (КМ) до сих пор используют клеевые соединения, которые при определенных темпах нагрева образуют неразъемные соединения, способные сопротивляться действующим нагрузкам при высоких температурах. Недостатком клеевых соединений является низкая сопротивляемость отрывающим нагрузкам и отсутствие возможности получить высокотемпературное соединение при сборке конструкции в нормальных



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 28)

ности (предела выносливости) по методу Локати находится в пределах 1,5–2,5 %, что в основном согласуется с данными других исследований.

Выводы

Следует отметить, что метод Локати отличается малой трудоемкостью, очень полезен при сравнительных испытаниях образцов, восстановленных различными способами, и может быть рекомендован для оценки эффективности способов восстановления при ремонте деталей тракторов и сельскохозяйственных машин. Погрешность предлагаемого метода составляет 1,5–2,5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. РД-50-686—89. Методические указания. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на ус-

талость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций. М.: Изд-во стандартов, 1989.

2. **Восстановление** деталей машин: Справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов и др. Под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

3. **Корнейчук Н. И.** Оценка контактной усталостной прочности износостойких гальванических покрытий применительно к восстановлению деталей машин // Труды ГОСНИТИ. Т. 128. 2017. С. 152—156.

4. **Батищев А. Н., Голубев Н. Т., Лялякин В. П.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / М.: Информагротех, 1985. 296 с.

5. **Лялякин В. П.** Ускоренные усталостные испытания коленчатых валов // Ежемесячное приложение к журналу "Стандарты и качество". № 12. 1977. С. 38—42.

6. **Лялякин В. П.** Усталостная прочность коленчатых валов двигателя А-41 // Труды ГОСНИТИ. Т. 49. 1979. С. 144—149.

условиях, так как для этого собранное соединение необходимо прогревать при повышенных температурах. Альтернативный способ соединения композитных конструкций — резьбовое соединение, воспринимающее все виды действующих нагрузок.

Однако изготовить резьбовую пару "винт—гайка" из композиционных материалов с определенной структурой армирования каждого отдельного витка не всегда можно. В связи с этим для определения несущей способности исследовали резьбовые соединения деталей из серийно изготавливаемых КМ. Одним из таких материалов является пространственно-армированный углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) со схемой армирования 4ДЛ, серийно изготавливаемый в АО "Композит" и используемый в современных летательных аппаратах в качестве конструкционного и теплозащитного. Схема армирования 4ДЛ — это четыре группы волокон (стержней), из которых три расположены в одной плоскости и развернуты относительно друг друга на 60° , а четвертая группа расположена перпендикулярно к указанной плоскости.

Недостатком УУКМ при изготовлении резьбовых элементов является повреждение армирующих волокон и снижение прочности витков при нарезании резьбы. В зависимости от поперечных размеров армирующего элемента масштабный эффект прочности витков может проявляться по-разному. Проведенные ранее исследования показали, что несущую способность витков можно снизить на 20÷30 % по сравнению с неповрежденным материалом.

Несущую способность резьбовой пары из УУКМ исследовали как при нормальной температуре, что необходимо для выбора технологических параметров сборки конструкции, так и при температурах выше $2500\text{--}3000^\circ\text{C}$, при которых изделие должно сохранять свою работоспособность.

Исследования резьбовых соединений из УУКМ при нормальной температуре проводили как в России [1–3], так и за рубежом [4–6]. Основными результатами данных работ стали количественная оценка несущей способности резьбовой пары из пространственно-армированных УУКМ и качественная оценка неравномерности распределения нагрузки по виткам резьбы в зависимости от анизотропии свойств материала.

Цель данной работы — экспериментальная оценка несущей способности резьбовой пары из пространственно-армированных УУКМ при температурах от 1900 до 2500°C и рекомендации по использованию резьбы из УУКМ при повышенных температурах.

Исследовали резьбовую пару из пространственно-армированного УУКМ со схемой армирования 4ДЛ с характерным поперечным размером армирующего элемента (стержня) $0,7$ мм. Материал мат-

рицы — кокс каменноугольного пека, изготавливаемый многократной пекопропиткой с последующими карбонизацией и графитизацией до конечной плотности ≈ 1950 кг/м³. Образцы изготавливали из заготовок разных партий, а результаты обрабатывали совместно. Это несколько увеличило разброс полученных значений, но позволило определить среднее значение несущей способности резьбового соединения из данного материала, что не противоречит поставленным задачам.

Несущую способность резьбовой пары из УУКМ исследовали в диапазоне высоких температур на установке "УВТК", созданной в АО "Композит" на базе модернизированной испытательной машины Schenck Trebel RMC 100 и предназначенной для определения прочностных, упругих и деформационных характеристик неметаллических КМ при температурах до 2700°C . Принцип действия установки "УВТК" — локальный нагрев исключительно рабочей части образца до температуры испытаний в инертной среде (аргон) с последующим приложением к образцу силовой нагрузки [7, 8]. В установке используется графитовый нагреватель, активная часть которого нагревается за счет джоулева тепла, образцу тепло передается путем лучистого теплопереноса через незначительный зазор, составляющий 3 мм, между нагревателем и образцом. Источник силового питания имеет обратную связь с автоматической системой управления (АСУ) по температуре, которая автоматически измеряется пирометром. Структурная схема установки приведена на рис. 1.

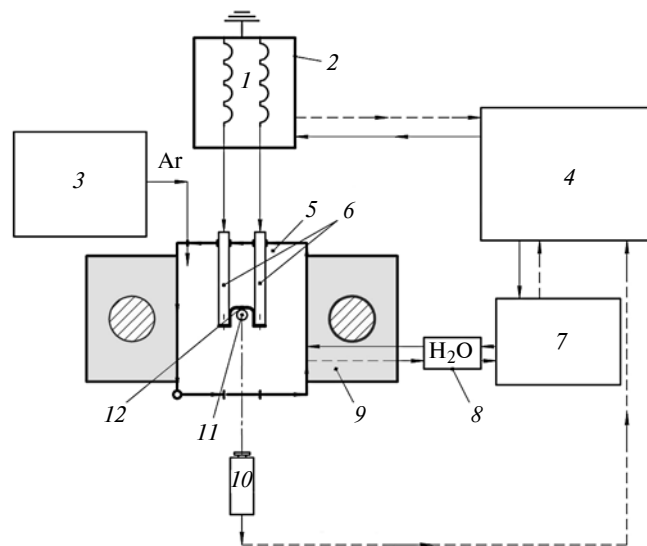


Рис. 1. Структурная схема испытательной установки:

1 — трансформатор; 2 — система силового электропитания; 3 — система создания инертной среды; 4 — автоматическая система управления; 5 — термокамера; 6 — токоподводы; 7 — система охлаждения; 8 — насос системы охлаждения; 9 — испытательная машина (вид сверху); 10 — пирометр; 11 — образец; 12 — графитовый нагреватель

Для нагрева образцов резьбового соединения спроектировали специальный U-образный нагреватель, изготовленный из высокоплотного графита марки МПГ-7 (рис. 2). Форма и размеры нагревателя определяются требованиями максимальной однородности температурного поля по контактной поверхности соединения. Для определения опти-

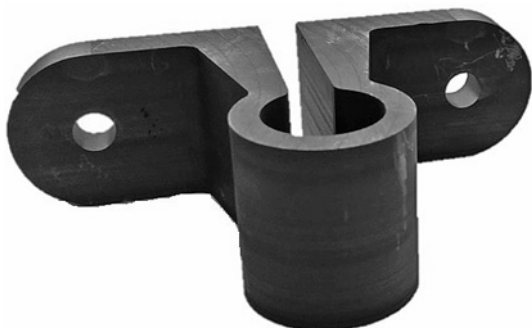


Рис. 2. Внешний вид U-образного нагревателя

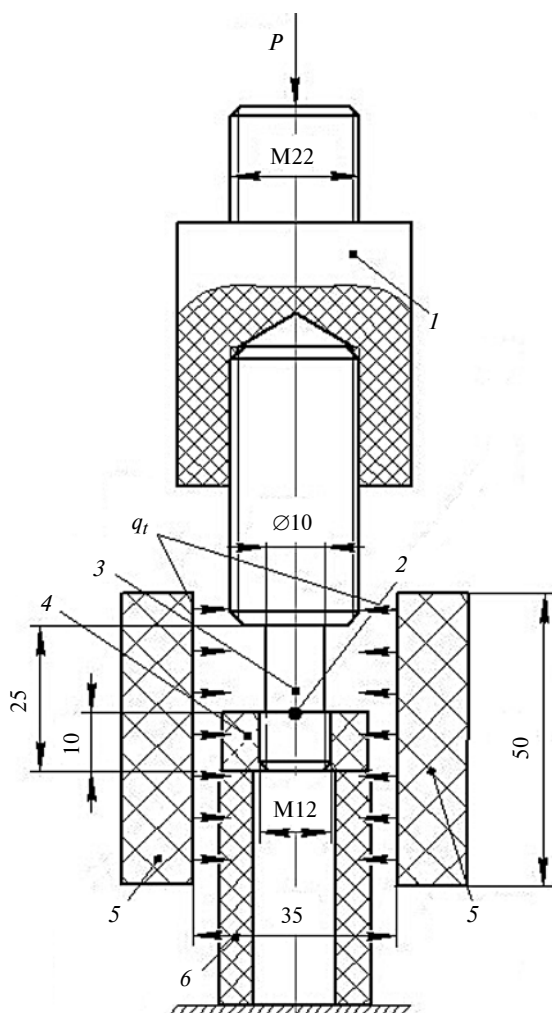


Рис. 3. Принципиальная схема эксперимента:

1 — столик для сжатия; 2 — точка фиксации температуры; 3 — шпилька M12; 4 — гайка M12; 5 — нагреватель; 6 — опорная втулка; q_t — тепловой поток

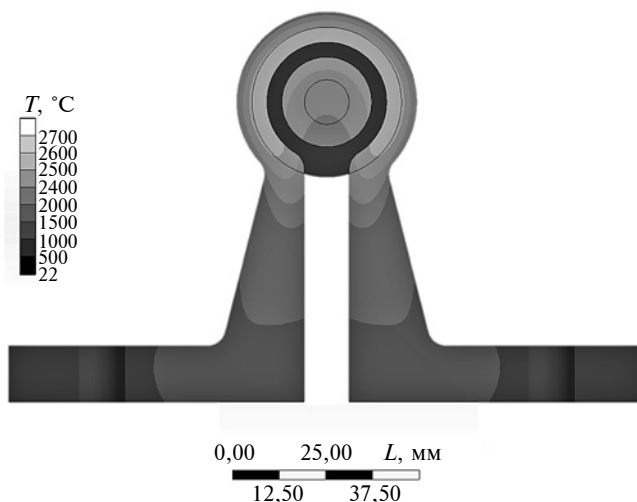


Рис. 4. Распределение температуры по поперечному сечению образца



Рис. 5. Характер разрушения резьбовой пары из УУКМ при высоких температурах

мальных параметров нагревателя провели серию расчетов температурного состояния системы "нагреватель—образец" в программе Ansys. Расчеты показали, что лучшую однородность распределения температуры по образцу обеспечивает схема, приведенная на рис. 3. Распределение температуры по поперечному сечению образца в его центральной части показано на рис. 4. Видно, что максимальный перепад температур в окружном направлении составляет ≈ 90 °С, причем температуры измерялись в области пониженных значений. В осевом направлении также имеет место градиент температур, причем более высокие значения — в средней части. Расчет показал, что перепад температур составляет около 100 °С. Температуру в эксперименте фиксировали в точке в месте перехода поверхности гайки на поверхность шпильки (см. рис. 3). Таким образом, можно сделать вывод, что измеренная в эксперименте температура отнесения несколько ниже средней температуры контактной поверхности. Расчетом также определяли время, за которое система "нагреватель—образец" возвращается в стационарное температурное состояние — это ≈ 90 с.

Испытывали образцы с резьбой М12, представляющие собой шпильки, длина которых достаточна для прогрева резьбы до необходимой температуры. Для исследования каждой температурной точки использовали не менее четырех образцов. Резбовое соединение имело не менее пяти рабочих витков, предварительная затяжка отсутствовала, усилие в резьбе имитировалось внешним осевым усилием сжатия. Скорость перемещения активного захвата составляла 5 мм/мин. Моментом разрушения резьбы считалось монотонное уменьшение нагрузки более чем на 50 % относительно максимальной. Время достижения температурной точки составляло не более 60 с, при достижении необходимой температуры образец выдерживали не менее 120 с, что гарантировало его стационарное температурное состояние.

Результаты экспериментального исследования несущей способности резьбы при осевом нагружении в условиях нормальных ($T_{нор}$) и высоких (действительных) T_d температур приведены в таблице. Характер разрушения резьбовой пары в диапазоне высоких температур приведен на рис. 5. Для оценки характера разрушения резьбы гайку специально разрезали вдоль оси. Экспериментально полученное распределение несущей способности P

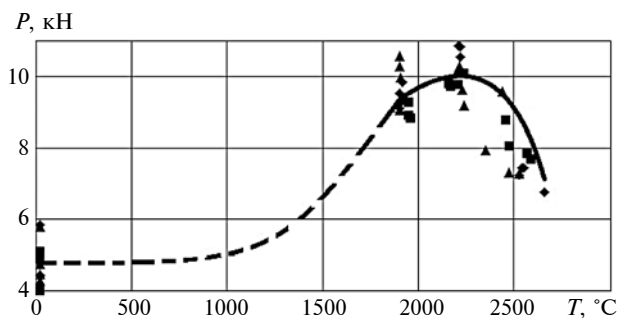


Рис. 6. Распределение несущей способности P резьбы по осям X (■), Y (▲) и Z (◆) в зависимости от температуры T

резьбовой пары по осям в зависимости от температуры T приведено на рис. 6.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

Так, несущая способность резьб, нарезанных в разных направлениях армирования материала, мало отличается на фоне естественного разброса экспериментальных значений, что проявляется при всех реализованных температурах испытаний. Описанный эффект можно связать с тем, что поперечное сечение профиля резьбы мало по сравнению со структурной ячейкой материала, и разрушение

Результаты экспериментального исследования несущей способности резьбы из УУКМ

Температура, °C	Направление распределения по оси					
	X		Y		Z	
	T_d , °C	P , Н	T_d , °C	P , Н	T_d , °C	P , Н
20	20	3993	20	4288	20	4442
	20	5086	20	4753	20	5862
	20	4892	20	5788	20	4404
	20	4077	20	4454	20	5062
	Ср. знач. ± ДИ	20	4512 ± 888	20	4821 ± 1073	20
1900	1960	8813	1905	9962	1900	9107
	1950	9253	1903	10 276	1916	9849
	1950	8912	1900	10 574	1910	9295
	1950	9255	1900	9057	1900	9517
	Ср. знач. ± ДИ	1953 ± 8	9058 ± 366	1902 ± 4	9967 ± 1046	1907 ± 13
2200	2160	9790	2240	9175	2210	10 851
	2210	9763	2230	9637	2220	10 551
	2170	9714	2216	10 283	2220	10 821
	2240	10 073	2200	10 138	2233	10 098
	Ср. знач. ± ДИ	2195 ± 59	9835 ± 258	2222 ± 28	9808 ± 804	2221 ± 15
2500	2460	8777	2530	7273	2660	6763
	2480	8049	2475	7309	2550	7435
	2590	7667	2350	7928	2540	7439
	2570	7836	2440	9587	2530	7241
	Ср. знач. ± ДИ	2525 ± 103	8082 ± 779	2449 ± 120	8024 ± 1728	2570 ± 96

ДИ — доверительный интервал, определенный с вероятностью 95 %.

происходит в результате локального повреждения одного из компонентов УУКМ, вероятнее всего, матрицы. Наличие и ориентация армирующих элементов при этом на прочность резьбы не оказывают значительного влияния.

Область максимальной прочности резьбового соединения соответствует интервалу температур от 1900 до 2200 °С. Имеющиеся данные показывают, что именно в этом интервале температур имеет место максимум предела прочности материала при сдвиге, полученный при экспериментальных исследованиях физико-механических характеристик материала. Однако при температуре 2500 °С прочность резьбы заметно уменьшается, что закономерно ввиду разупрочнения рассматриваемого УУКМ.

В то же время представленные данные показывают, что при ожидаемой температуре эксплуатации несущая способность резьбового соединения многократно превышает его несущую способность при нормальной температуре. Таким образом, при проектировании подобных соединений целесообразно проводить проверочные расчеты, учитывающие разные этапы эксплуатации изделия:

сборка изделия при нормальной температуре, когда необходимо определить допустимый момент затяжки резьбового соединения, так как внешние нагрузки, приложенные к стыку, отсутствуют. Однако следует учитывать крутящий момент, возникающий в процессе затяжки резьбы, и сравнительно невысокую прочность резьбового соединения;

транспортировка изделия, когда возможны небольшие по модулю знакопеременные внешние нагрузки, приложенные к стыку резьбового соединения, при нормальной температуре, а крутящий момент отсутствует;

эксплуатация резьбового соединения, когда крутящий момент отсутствует, однако учитывается внешняя нагрузка, нагружающая стык, и действующая одновременно с ней повышенная температура, при том, что несущая способность резьбы существенно выше, чем прочность при нормальной температуре. Данный расчет следует проводить с учетом зависимости несущей способности резьбы от температуры на разных стадиях эксплуатации изделия.

Такой подход позволит гарантировать не только отсутствие предварительного разрушения композитных метизов в процессе сборки изделия, но и избежать переутяжеления конструкции за счет завышенных допускаемых коэффициентов запаса прочности.

Выводы

На основании экспериментального исследования резьбовой пары из УУКМ определена несущая

способность резьбовой пары в диапазоне рабочих температур от 20 до 2500 °С.

Подтверждено многократное повышение несущей способности резьбовой пары в диапазоне температур от 1900 до 2200 °С и установлена граница температуры, при которой несущая способность резьбовой пары из УУКМ заметно снижается. Уменьшение предельной нагрузки зафиксировано при температуре 2500 °С, что соответствует физико-механическим свойствам материала при высоких температурах.

Даны рекомендации по проектированию резьбовых соединений из УУКМ, работающих при высоких температурах, гарантирующие отсутствие предварительного разрушения резьбовых элементов на этапе сборки конструкций и уменьшение вероятности переутяжеления конструкции за счет снижения допускаемых коэффициентов запаса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Захаров М. Н., Любченко М. А.** Исследование предельных нагрузок для резьбовых соединений из углерод-углеродных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 4. С. 82—87.
2. **Захаров М. Н., Любченко М. А., Магнитский И. В.** Критерий разрушения резьбовых соединений деталей из композитных материалов // Вестник машиностроения. 2018. № 12. С. 3—6.
3. **Любченко М. А., Магнитский И. В.** Оценка прочности резьбового соединения из углерод-углеродного композиционного материала при проектировании деталей из композита // Вопросы оборонной техники. Секция 15. 2018. № 3 (190). С. 14—20.
4. **Pull-Through Mechanical Behavior of Composite Fastener Threads / Zhidong Guan, Junwu Mu, Fei Su, et al.** // Applied Composite Materials. 2014. V. 22. Issue 3. P. 251—267.
5. **High-temperature** tensile properties and oxidation behavior of carbon fiber reinforced silicon carbide bolts in a simulated reentry environment / Hui Mei, Laifei Cheng, Qingqing Ke, et al. // CARBON. 2010. V. 48. P. 3007—3013.
6. **Kushwaha J., Kumar V. P., Sinnur K. H.** Development and Evaluation of Carbon-Carbon Threaded Fasteners for High Temperature Applications // Defence Science Journal. 2012. V. 62. N. 5. P. 348—355.
7. **МВИ № 02262-11—2008.** Установка УВТК для механических испытаний материалов. Методика выполнения измерений при определении прочностных, упругих и деформационных свойств неметаллов при одноосных нагружениях в интервале T (20—2700) °С (изм. 2016 г.). Королев: Изд-во АО "Композит", 2016. 40 с.
8. **Магнитский И. В., Пономарев К. А., Миронихин А. Н.** Доработка и настройка установки для механических испытаний композиционных материалов при высоких температурах // Матер. XIX науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов / Под ред. В. В. Сиявского. Королев (МО): РКК "Энергия", 2012. С. 231—235.

М. А. БЛОХИН, д-р техн. наук, Э. Ю. ГРАЧЕВА, И. И. ПАВЛОВА (МГТУ им. Н. Э. Баумана),
e-mail: hornet10@yandex.ru

Особенности проектирования многопильного блока в виде коленчатой пилы

Рассмотрены особенности разработки распиловочного оборудования с круговым поступательным движением полотен. Предлагаемое решение обеспечивает повышение производительности и ресурса оборудования, снижения энергопотребления и металлоемкости распиловочного станка.

Ключевые слова: распиловочный станок, динамическая балансировка, круговое поступательное движение.

The features of the development of sawing equipment with circular translational motion of blades are considered. The proposed solution provides an increase in the productivity and service life of the equipment, reduction of energy consumption and metal consumption of the sawing machine.

Keywords: sawing machine, dynamic balancing, circular translational motion.

В настоящее время самым распространенным оборудованием для распуска бревен или бруса на доски остаются станки с возвратно-поступательной пильной рамкой [1–3].

В стратегии лесного комплекса РФ до 2030 г. отмечается, что к 2030 г. мировой спрос на пиломатериалы составит 595 млн м³/год, а темп прироста составит до 2 %/год. Россия увеличит производство пиломатериалов с 42,6 до 69,5 млн м³. Новые объемы будут направлены как на внутренний рынок, так и на экспорт, преимущественно в Китай. К 2030 г. ожидается увеличение внутреннего спроса на пиломатериалы с 16,3 до 24,7 млн м³/год. Предполагается, что спрос на российские пиломатериалы на экспортных рынках вырастет с 26,3 до 44,8 млн м³/год.

Оборудование для изготовления пиломатериалов постоянно совершенствуется [4–8].

Главным узлом распиловочного станка является многопильный блок (рис. 1). Основной частью пильного блока является пильный модуль, состоящий из пильного полотна 1, верхнего (2) и нижнего (3) шарнирных узлов, упругого элемента 4, пальцев 5 и 6.

При модернизации пильного модуля Триумф (рис. 2) решались следующие задачи:

обеспечение устойчивости полотна (сохранение формы) при вращении пильного модуля [5];

разработка принципа подбора универсальных корректирующих масс для верхнего и нижнего шарниров [6];

разработка математической модели автоматизированного пильного блока при многокритериальном проектировании [7–11];

обеспечение отрицательной обратной связи при взаимодействии сил $F_{\text{п}}$ подачи и сил f сопротивления резанию при рабочем движении полотен пильного модуля для обеспечения их абсолютной устойчивости.

Последняя задача предполагает снижение силы F_0 натяжения полотна до 250÷750 Н, что обеспечивает повышение ресурса подшипников 7 (см. рис. 2). Силы f сопротивления резанию возрастают по мере скопления продуктов резания в результате их перемещения с верхних межзубовых впадин в нижние впадины, что обусловлено движением полотна. Для повышения устойчивости нижней половины полотна его внецентренное растяжение следует увеличить, а верхнее — уменьшать, что повышает частоту его параметрического резонанса.

При проектировании пильного блока важным является динамическое уравнивание валов

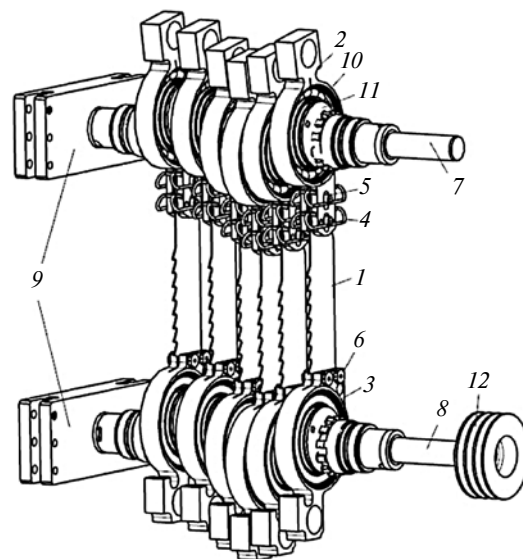


Рис. 1. Пильный блок станка

1 — пильное полотно; 2 и 3 — верхний и нижний шарнирные узлы; 4 — скоба (упругий элемент); 5 — палец; 6 — нижний палец; 7 и 8 — верхний и нижний валы; 9 — плавающий корпус (подшипниковые опоры валов); 10 — подшипник; 11 — эксцентрик; 12 — шкив

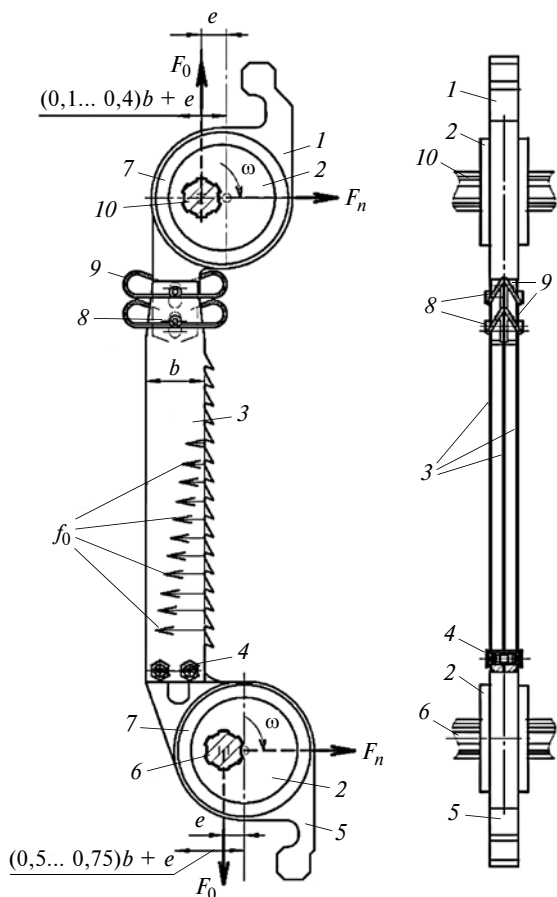


Рис. 2. Пильный модуль Триумф:

1 и 5 — верхний и нижний шарнирные узлы; 2 — эксцентрик; 3 — пильное полотно; 4 — нижний палец; 6 и 10 — нижний и верхний валы; 7 — подшипник; 8 — палец; 9 — скоба (упругий элемент); F_0 — суммарная сила натяжения полотен в пильном модуле; f — силы противодействия резанию (пилению)

без привлечения дополнительных корректирующих масс.

Оптимальное число пильных модулей, размещенных на валах пильного блока, — шесть. Это позволяет получать пиломатериал стандартных типоразмеров и обеспечивает динамический баланс инерционных сил от пильных модулей при вращении без дополнительных балансирующих устройств. Максимальные размеры сечения получаемого бруса 440×280 мм.

Возможные варианты схемы динамического уравновешивания валов пильного блока, т. е. проекции приведенных сил инерции пильных модулей в плоскости YZ на вале пильного блока, представлены на рис. 3, где F — силы инерции пильных модулей.

Сумма моментов сил инерции шести модулей на вале пильного блока относительно подвижной оси X (см. рис. 3) в плоскости YZ имеет вид:

$$\sum M_x = bF_1 - (b + a)F_2 \cos 60 - (b + 2a)F_3 \cos 60 - (b + 3a)F_4 + (b + 4a)F_5 \cos 60 + F_6 \cos 60, \quad (1)$$

где $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6$ по абсолютной величине.

Расчеты показывают, что во всех плоскостях суммы моментов сил инерции от шести пильных модулей (см. рис. 3) равны нулю:

$$\sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0. \quad (2)$$

Вариант 2 в отличие от варианта 1 (см. рис. 3, а и б) отличается угловым расположением пильных модулей, что уменьшает максимальный прогиб вала под действием сил натяжения полотен шести пильных модулей на 35 %.

Желательно уменьшить прогиб вала или исключить его совсем для снижения колебаний полотен при вращении вала, которые возникают из-за разворота пильного модуля в плоскости YZ , что приводит к знакопеременному перемещению участков корпуса шарниров и полотна в плоскости его наименьшей жесткости.

Вариант 3 (рис. 3, в) асимметричного расположения пильных модулей также обеспечивает динамический баланс пильных модулей. При этом номенклатура выпускаемого пиломатериала по толщине увеличивается на единицу.

Также возможен вариант 4 (см. рис. 3, г) углового размещения пильных модулей, обеспечивающий

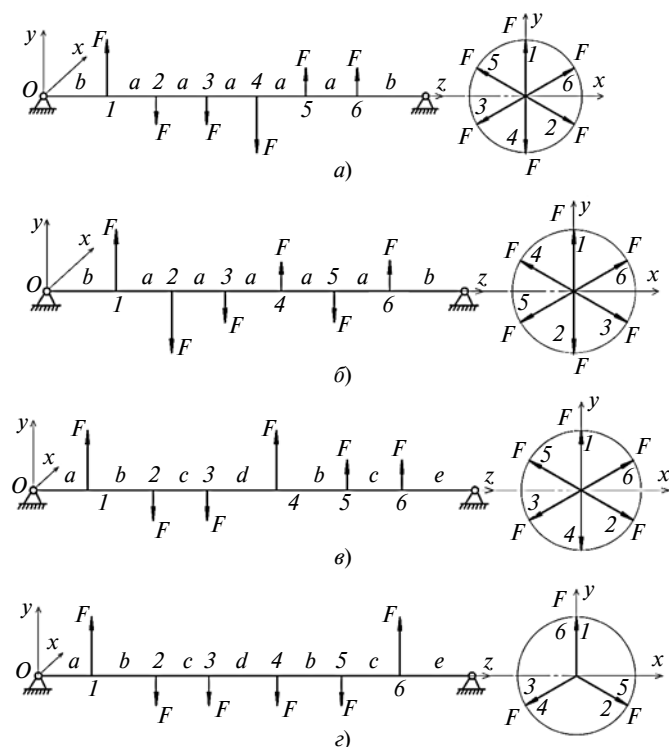


Рис. 3. Возможные варианты схемы динамического уравновешивания валов пильного блока:

а, б — симметричное расположение (варианты 1 и 2); в — асимметричное расположение (вариант 3); г — динамическая балансировка пильного блока (вариант 4)

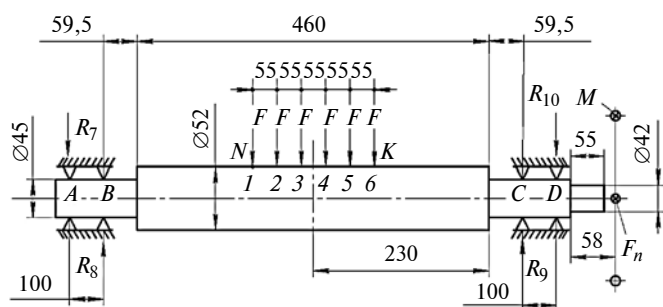


Рис. 4. Схема закрепления концов нижнего вала пильного блока в заделке

динамическую балансировку валов пильного блока без дополнительных корректирующих масс. Однако реализация этой схемы в данном случае неприемлема, поскольку не обеспечивает условия непрерывного поочередного процесса резания заготовки пильными модулями как одного из условий отсутствия вибрационных сил.

Для разработки конструкции пильного блока выбрана схема варианта 2 (см. рис. 3, б). При размещении валов с закреплением их концов в заделке (рис. 4) максимальный прогиб в точках 2 и 3 снижается в 2,5–3 раза.

Долговечность нижнего вала должна составлять не менее 125 тыс. ч при частоте вращения 2500 мин^{-1} , т. е. ресурс вала должен быть не менее $7,5 \times 10^9$ циклов, что соответствует 16-часовому ежедневному режиму работы станка в течение 30 лет [12, 13].

Параметры валов и их прочностные показатели зависят от возможностей шлицефрезерного или шлицешлифовального оборудования при обработке заготовок допустимых длины и диаметров, а также технологическими возможностями производственной базы и металлорежущего оборудования, в том числе наличием вертикальной или иной приемлемой закалочной печи.

При выборе материала заготовки следует учитывать возможность появления конденсата в зоне сопряжения валов и эксцентриков из-за нагревания и последующего охлаждения подшипников шарнирных узлов пильных модулей. Валы и эксцентрики пильных модулей должны быть защищены от коррозионного изнашивания, в противном случае возможно стопорение эксцентриков на валах, что недопустимо.

Выбран вал из нержавеющей стали 40X13, который может работать при температуре $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Вал прошел термическую обработку: закалка в масле при $T_3 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Показатели механических свойств стали 40X13: модуль упругости $E = 2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ при $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; пределы прочности: $\sigma_B = 1710 \text{ МПа}$, $\sigma_0 = 1460 \text{ МПа}$; твердость $HRC = 46 \div 51$.

В расчетах прочностных показателей существуют некоторые различия, обусловленные спецификой имеющихся концентраторов напряжений: галтелей, шпоночных пазов, прессовых посадок подшипников.

Для повышения точности расчета нижнего вала (наиболее нагруженный элемент) были созданы пользовательские сечения в середине вала и в зоне прессовой посадки подшипников (см. рис. 4, сечение в точке С).

Расчетная схема нижнего вала пильного блока и эпюры силовых факторов приведены на рис. 5.

Усталостные показатели вала определяли в соответствии с рекомендациями работ [9–11].

С целью многокритериальной оптимизации проанализированы параметры управления долговечностью нижнего вала пильного блока. Варьируемые параметры: усилие F натяжения пильных полотен; диаметр вала; длина вала; расстояние h между точками С и D (см. рис. 4) и пр. По критерию качества определяли: долговечность станка, стоимость его изготовления, массу станка, габаритные размеры пильной рамки и пр.

Решение принималось конструктором и технологом в пользу варьирования одним из параметров управления. Для оценки возможности повышения ресурса нижнего вала пильного блока выполнен расчет балочной модели при уменьшении размера между внутренними подшипниками опорных подшипниковых узлов (точки В и С). Был реализован вариант расчета с дискретным изменением длины вала для анализа зависимости долговечности вала от его длины (рис. 6).

Оценка ресурса нижнего вала обусловила выбор его оптимальных габаритных размеров.

Прочностной расчет прогиба нижнего вала по схеме, представленной на рис. 4, в самой напряженной точке С выполняли с учетом нагрузки от крутящего момента M на шкиве 9 и нагрузки от усилия F_n ременной передачи от электродвигателя 10.

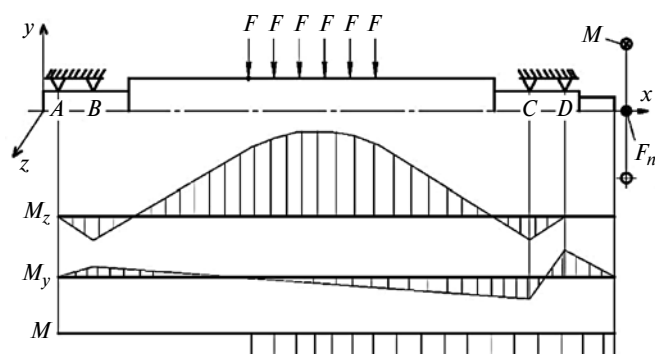


Рис. 5. Расчетная схема нагрузки нижнего вала моментами сил без учета поперечных сил и эпюры моментов сил F натяжения полотен (M_z), силы F_n ременной передачи (M_y), момента M кручения на шкиве вала

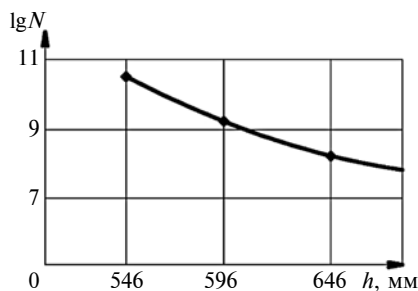


Рис. 6. Зависимость ресурса N нижнего вала от расстояния h между опорными узлами нижнего вала пильного блока

Полученные значения напряжений при $F = 750$ Н, $M = 50$ Н·м и $F_n = 600$ Н подтвердили возможность уменьшения диаметра шлицевых валов до 50 мм. Это, в свою очередь, приведет к усилению ходовых винтов 6 (рис. 7) до приемлемого диаметра 16 мм при посадочном размере 134,6 мм подшипника № 292124 с установкой его на эксцентрик 2 (см. рис. 2).

Рассчитав реакции в программе ANSYS и коэффициенты запаса при соответствующих значениях внутренних силовых факторов в самом слабом сечении, получили зависимости ресурса нижнего вала (в функции $\lg N$) от расстояния h между подшипниками опорных узлов (точки B и C) нижнего вала пильного блока (см. рис. 6).

Из полученных расчетных данных с учетом требований, имеющихся нагрузок и обнаружен-

ных концентраторов напряжений в представленной конструкции нижнего вала пильного блока установлено следующее:

определен один из способов повышения коэффициента запаса прочности вала, основанный на изменении его линейных размеров;

по алгоритму расчета ресурса вала установлена зависимость его ресурса от длины;

уменьшением расстояния между внутренними подшипниками опорных подшипниковых узлов, но без изменения общего размера, снижены изгибные напряжения в самом опасном сечении (в точке C);

для более точного определения ресурса вала требуются испытания материала на усталостную прочность.

По результатам расчетов валов по балочной модели выполнена корректировка конструкторской документации на детали пильного блока.

При установке в каждом пильном модуле по одному полотну согласно схеме, представленной рис. 3, b (асимметричное расположение пильных модулей), можно получать пиломатериалы трех типоразмеров: толщиной b , c и d . При установке в каждом пильном модуле по 2 или 3 полотна, число получения разных по толщине вариантов пиломатериала увеличивается еще на один типоразмер, что обусловлено числом полотен в каждом пильном модуле. В каждом пильном модуле можно установить от 1 до 3 полотен.

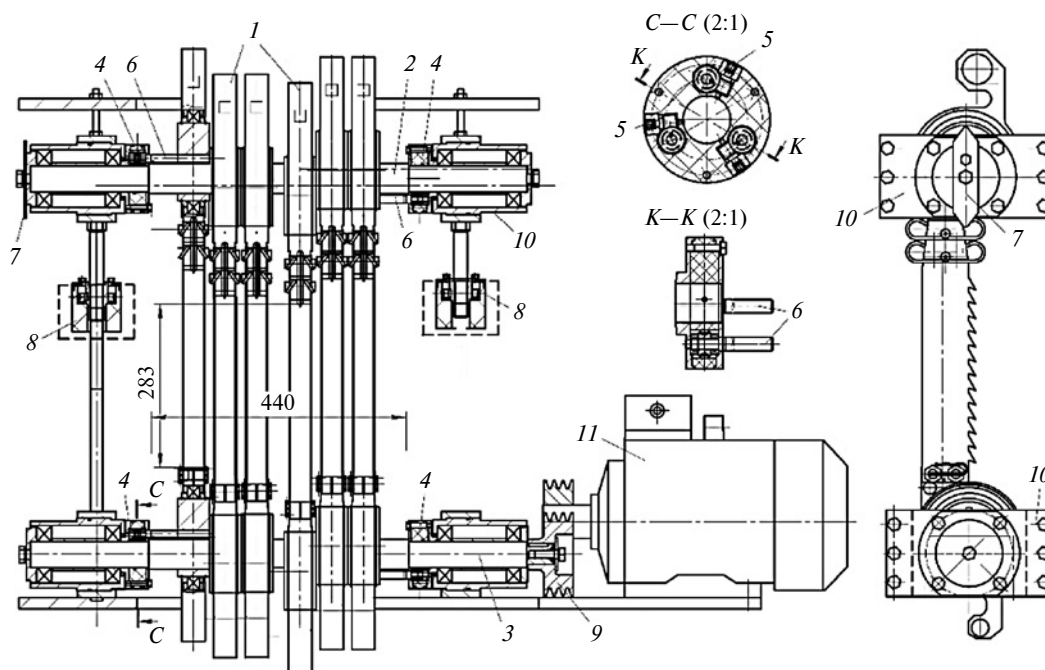


Рис. 7. Пильный блок Триумф с механическим приводом:

1 — пильные модули; 2 — верхний вал; 3 — нижний вал; 4 — механический привод перепозиционирования пильных модулей; 5 — червяк; 6 — ходовой винт; 7 — флажок; 8 — механизм подъема верхнего вала; 9 — шкив; 10 — опорный подшипниковый узел; 11 — электродвигатель

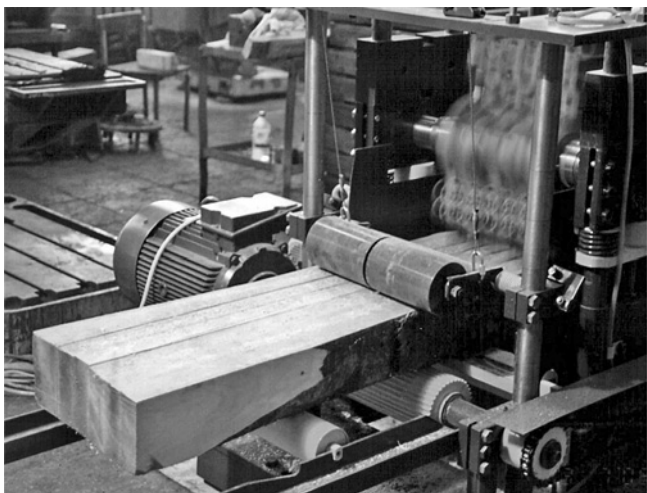


Рис. 8. Распиловка бруса на опытном станке с круговым поступательным движением полотен

Предварительные расчеты показали, что пильный блок (см. рис. 7), снабженный механическими приводами 4 (сечение $C-C$), может увеличить в 1,5–2 раза производительность распиловки двухкантных брусьев разных типоразмеров, так как позволяет оперативно перепозиционировать пильные модули на валах пильного блока и изменять толщины выпускаемого пиломатериала. Это обеспечивает распиловку без предварительной сортировки пиловочника по размерам, что особенно актуально вблизи мест его складирования и на лесосеке, а также значительно сокращает расходы на транспортировку пиловочника к месту его переработки.

Перепозиционирование модулей 1 на валах 2 и 3 пильного блока осуществляется проворотом ходовых винтов 6 червяками 5 с помощью гибкого вала с магнитным адаптером (не показан), соединенного с механизмом поворота (шуруповерт, дрель и др.) [7]. Перемещение верхнего и нижнего шарнирных узлов каждого пильного модуля на валах пильного блока синхронизировано.

В случае электромеханического исполнения привода перепозиционирования модулей на валах пильного блока [7] предусмотрен поворот и угловая фиксация валов, определяемая угловым положением флажка 7.

Представленная конструкция пильного блока (рис. 8) позволяет при незначительных доработках и наличии комплектующих выполнять рабочие функции с элементами автоматизации [8], что позволит:

- повысить производительность пильного блока;
- повысить ресурс пильного модуля ввиду уменьшения силы натяжения пильных полотен, а также ресурсы подшипников;
- снизить энергопотребление;

снизить разнотолщинность выпускаемого пиломатериала, что снижает затраты на дальнейшую обработку пиломатериала.

Уменьшение сил натяжения полотна снижает энергопотребление пильного модуля при холостом ходе на 25 %, потребляемую мощность на 35 % и увеличивает его ресурс на 45 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Блохин М. А.** Исследование, разработка и создание лесопильного оборудования с круговым поступательным движением пильных полотен: Дис. ... д-ра техн. наук: М., 2015.
2. **Гаврюшин С. С., Блохин М. А., Фунг В. Б.** Анализ лесопильного станка с использованием виртуальной математической модели // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 12. С. 128–136.
3. **Фунг В. В., Данг М. Х., Гаврюшин С. С.** Разработка математической модели для процесса управления жизненным циклом многопильного станка нового типа // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. № 2. С. 87–109.
4. **Блохин М. А.** Отстройка рабочих частот пильного модуля при плоском вращательно-поступательном движении полотен в составе многопильного блока // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 36–41.
5. **Блохин М. А., Подлесный Д. А., Родионов О. А.** Решение задачи снижения влияния боковой силы на устойчивость пильного полотна // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 2. С. 127–128.
6. **Блохин М. А., Подлесный Д. А.** Решение задачи универсальной корректирующей массы в многопильном модуле с круговым поступательным движением полотен // Вестник машиностроения. 2020. № 3. С. 3–7.
7. **Блохин М. А.** Мехатроника и робототехника в лесопильном оборудовании // Вестник машиностроения. 2019. № 8. С. 33–37.
8. **Блохин М. А., Подлесный Д. А.** Автоматизация процесса и повышение эффективности многопильного оборудования с круговым поступательным движением полотен // Вестник машиностроения. 2020. № 5. С. 41–46.
9. **Фунг Ван Бинь.** Автоматизация и управление процессом принятия решений при многокритериальном проектировании пильного блока лесопильного станка: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана.
10. **Phuong B. V., Gavriushin S. S., Minh D. H.** Application of a novel model requirement—object—parameter for design automation of complex mechanical system // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1127. P. 375–384.
11. **Гаврюшин С. С.** Элементы управляемой упругой деформации для функциональных устройств робототехнического оборудования // Мехатроника. 2000. № 5. С. 16.
12. **Galakhar A. S., Gavryushin S. S.** Defining the assigned useful life of operational facilities taking into account the safe operation index // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. N. 4. P. 345.
13. **Валиашвили Н. В., Гаврюшин С. С.** Сопrotивление материалов и конструкций. М.: Юрайт, 2017. 429 с.

Р. Р. ФАТКИЕВА, канд. техн. наук, Ю. А. ШИЧКИНА, д-р техн. наук (ФГБОУ высшего профессионального образования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), e-mail: rikki2@yandex.ru, strange.y@mail.ru

Метод реконфигурации промышленных объектов с применением аппарата кусочно-линейных агрегатов

Разработан метод структурно-функциональной реконфигурации промышленных объектов на базе кусочно-линейных агрегатов, с ранжированием элементов по значимости выполнения их целевой функции. Метод позволяет осуществить сопряжения элементов сложных технических объектов с использованием оператора сопряжения. Приведен пример применения предложенного метода.

Ключевые слова: реконфигурация, промышленный объект, система, кусочно-линейные агрегаты, синтез элементов.

A method has been developed for structural and functional reconfiguration of industrial facilities based on piecewise linear aggregates, with ranking elements according to the importance of fulfilling their target function. The method allows for the conjugation of elements of complex technical objects using the conjugation operator. An example of the application of the proposed method is given.

Keywords: reconfiguration, industrial facility, system, piecewise linear aggregates, synthesis of elements.

Развитию исследований в области системных связей и закономерностей функционирования промышленных объектов (ПО) с учетом отраслевых особенностей и факторов, ориентированных на повышение эффективности управления этими системами и ПО в целом с использованием современных методов обработки информации, уделяется большое внимание как в РФ, так и за рубежом [1–14]. Однако, несмотря на исследования и предложенные решения по организации взаимодействия систем, его составляющих, ряд проблем остаются нерешенными. Связано это в первую очередь с такими особенностями ПО, как наличие множества уровней в структуре, большого числа различных взаимосвязей подсистем, и с многофункциональностью его подсистем. Перечисленные особенности влекут за собой многообразие вероятностных состояний функционирования, динамичность и нелинейность, а также трудность при оценивании поведения ПО. Функционирование ПО и взаимодействие с внешней средой в условиях воздействия случайных факторов приводят к трудностям оценки рисков из-за наличия уязвимостей разной степени на разных уровнях их взаимодействия.

Указанными характеристиками обладают ПО систем различных классов (промышленных, ин-

формационно-управляющих, логистических и др.), например информационно-диагностических систем (АСУТП, SCADA) или сложных сетевых систем, как система "интернет-вещей" и технологий киберфизических систем. Отличительными признаками перечисленных ПО являются заданные ограничения: по элементам и функциям, входящим в состав его структурно-функциональных подсистем; по управляющим воздействиям; по механизмам адаптации к изменениям условий функционирования, периоду времени функционирования и управления; по сценариям взаимодействия, ошибкам и случайным возмущениям, приводящим к вынужденному изменению структуры. Перечисленные особенности приводят к необходимости поиска множества вариантов синтеза систем, составляющих ПО, для организации его безопасного функционирования. Однако поиск такого множества связан с решением комплекса задач, в которые входят:

1. *Анализ и формализация процессов информационного взаимодействия систем, составляющих ПО.* Трудности формализации, как правило, заключаются в динамичности изменения информации о функционировании систем, взаимосвязях их подсистем, нелинейном характере их поведения, цикличности алгоритмов функционирования. Учет фактора времени, при котором сами процессы изменяются в разных временных интервалах, может привести к состояниям, при которых имеют место нарушения функционирования, не учитываемые в системе показателей функционирования. Возникает необходимость построения комплекса многокритериального планирования структурно-функционального синтеза систем, составляющих ПО.

2. *Оценивание состояний ПО,* обусловленное огромным многообразием вероятностных состояний, что затрудняет предсказуемость поведения ПО. Это приводит к отставанию в разработке методов структурно-параметрического синтеза систем, составляющих ПО и идентификацию нарушений при функционировании в условиях динамического изменения структурно-функциональной организации ПО.

3. *Формализация стратегического планирования взаимодействия систем, составляющих ПО,* а также проблемы эффективности оценивания и управления при интеграции этих систем. Существующие методики организации и оценки показателей функ-

ционирования ПО не позволяют учитывать динамику изменения его структурно-функциональной организации, при которой быстрая интеграция существующих систем не всегда возможна из-за несовместимости элементов сопряжения. В этих условиях структурно-параметрический синтез систем требует необходимости внесения изменений как в архитектуру непосредственно самих систем, составляющих ПО, так и моделей их взаимодействия.

4. *Формирование системы показателей функционирования ПО* в условиях взаимодействия между системами, его составляющими. Структурно-параметрический синтез систем, составляющих ПО, и моделей взаимодействия этих систем в большинстве случаев влечет за собой пересмотр уже сформированной системы показателей функционирования, а также временные и финансовые затраты на их пересмотр. Формирование пространства реконфигурации при динамическом изменении состояний ПО необходимо для коррекции его поведения или при переходе из одного состояния в другое. Однако управление реконфигурацией ПО по своей структуре многофункционально и может привести к снижению устойчивости его функционирования.

5. *Наличие составной инфраструктуры управления* с присутствием уязвимостей, связанных со структурной динамикой ПО, не всегда позволяет оперативно перестроить совокупность систем, его составляющих, для организации безопасного функционирования при возникновении нарушения функциональной безопасности.

Развитию исследований в области функционирования ПО уделяется большое внимание как в России, так и за рубежом. В работе [2] рассмотрена проблема построения отказоустойчивого управления с применением логико-динамического подхода, позволяющего осуществлять реконфигурацию ПО при возникновении дефектов функционирования. Задачи по формированию возможных конфигураций технической системы с избыточными компонентами и ее аналитическое решение рассмотрены в исследованиях [3–5]. Вопросы логики взаимодействия ПО представлены в работах [6, 7, 9]. Выбор метода синтеза оптимизационной модели ПО из множества сценариев реконфигурации отражен в работах [7, 8]. Но, несмотря на разработку моделей и методов структурно-параметрического синтеза при реконфигурации ПО, не проработаны проблемы сопряжения элементов при взаимодействии систем, составляющих ПО, в связи с чем разработка методов синтеза конечных элементов ПО актуальна.

Теоретический аспект

К основной задаче функционирования ПО можно отнести поддержание его состояния в пределах допустимых реализаций структурно-функциональ-

ной организации на интервале времени $t \in T$. Тогда модель функционирования ПО можно представить в виде:

$$W = \max_{i \in \Omega} W_i(S, O, C, P, U), \quad (1)$$

где W_i — выполнение целевой функции ПО; S — множество структурных элементов, входящих в ПО; O — множество процессов функционирования; C — множество состояний; P — множество показателей, отражающих функционирование ПО; U — множество управляющих воздействий для перевода элементов из одного состояния в другое.

К задачам реконфигурации отнесем коррекцию структурно-функциональной организации ПО при возникновении нештатной ситуации из-за изменений:

структурной организации ПО вследствие отказа элементов из множества S ;

состояний функционирования ПО в процессе функционирования и перехода из состояния в состояние, описываемого выражением $c(t) \rightarrow c'(t) \rightarrow c''(t) \dots \in C'(t) \subseteq C(t)$;

процессов функционирования ПО в условиях перехода из одного процесса в другой за заданный промежуток времени: $o(t, u) \rightarrow o'(t, u) \rightarrow o''(t, u) \dots \in O'(t, u) \subseteq O(t, u)$, где O — множество процессов функционирования; o — элемент множества процессов функционирования;

В случае возникновения нештатной ситуации требуется найти такой оптимальный сценарий коррекции структурно-функциональной организации ПО, при котором на заданном промежутке времени достигается выполнение целевой функции на заданных элементах:

$$\begin{aligned} W_i &\rightarrow \{C'(t) \rightarrow C''(t) \in C'(t) \cap C''(t) = \{\}; \\ O'(t) &\rightarrow O''(t) \in O'(t) \cap O''(t) = \{\}\}. \end{aligned}$$

Решение поставленной задачи имеет ряд аспектов, в частности: необходимость декомпозиции элементов ПО с последующим поиском оптимального варианта его функционирования из множества сценариев реконфигурации, оперативного синтеза элементов, входящих в структурную организацию, выбора структуры системы управления для решения задачи минимизации операционных издержек за заданный промежуток времени.

В этом случае задача синтеза состоит в одновременном выполнении следующих ограничений:

1) наличие необходимой структурно-функциональной элементной базы для формирования ПО с учетом возможности их отказов. Структурная взаимосвязь функциональных i -х элементов разных L -иерархических уровней определена как

$$\varphi(S) = S^L \rightarrow \bigcup_{l=1}^L S_l; \quad (2)$$

2) обеспечение стабильных значений показателей функционирования элементов и процессов, согласно заданным верхним и нижним границам пороговых значений показателей соответственно, в фиксированный момент времени t заданного интервала T .

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что структурно-динамическая реконфигурация предполагает решение основных задач, к которым относятся:

анализ динамической топологической структуры, в том числе исследование технической, технологической, организационных структур;

разработка эквивалентных планов (сценариев) структурно-функциональной реконфигурации в динамически изменяющихся условиях;

синтез структурно-функциональной реконфигурации, которая обеспечивает гарантированный уровень функционирования ПО в условиях заданных правил перестроения с учетом множества управляющих воздействий;

мониторинг структурной динамики и показателей качества функционирования для достижения поставленных перед ПО целей (1).

Применение аппарата кусочно-линейных агрегатов

Решение указанного комплекса задач можно начать с отражения успешности выполнения целевой функции (1) через оценку показателей, формирующих качество его функционирования. Используя множество показателей операционного процесса P_o , отражающего качество работы, опишем функционирование ПО в состояниях S в виде вектора частных показателей процесса функционирования при управляющих воздействиях u , характеризующего изменения структурных и функциональных характеристик $P_o(c, u) \rightarrow P'_o(c, u) \rightarrow P''_o(c, u) \dots \in P_o(c, u) \subseteq P_o(1, \dots, M)$. Значение показателей качества функционирования ПО в каждом состоянии зависит от распределения операций обработки на структурном элементе, поэтому суть решаемой задачи сводится к подбору оптимального сценария последовательности плановых операций, обеспечивающего рациональный переход из системы с нарушением качества функционирования в требуемое состояние. В этом случае эффективность функционирования ПО определяется объемом пространства состояний, которое ограничивается, с одной стороны, реализацией процесса функционирования в реальном процессе и, с другой стороны, заданным (требуемым) ходом этого процесса. Успешность функционирования заключается в достижении целевой функции, при которой обеспечивается оптимальный синтез вариантов структуры ПО при его функционировании.

В этих условиях сценарий коррекции структурно-функциональной организации (2) можно определить как преобразование множества структурно-функциональных элементов в виде объединения их в совокупности для решения целевых задач:

$$\varphi(S_n^L) = G^L(S_k^L) \rightarrow \bigcup_{l=1}^L \varphi^L(S),$$

где $G^L(S_k^L)$ — множество алгоритмов преобразований для L -го иерархического уровня синтеза k -ми элементами ПО для функционального объединения $\varphi^L(S)$ структурных элементов. В этом случае алгоритм преобразования $G^L = Alg(S_k^L, P_S^L)$ зависит от структуры ПО, от его S_k^L и P_S^L структурно-функциональных характеристик. Тогда решение задачи реконфигурации ПО можно свести к выражению

$$\varphi(S_k^L) = \min_{k \in \Omega} S_k^L \max_{s \in \Omega} P_S^L.$$

Однако для минимизации элементной базы ПО возникает необходимость разработки механизмов оптимизации сопряжения элементов, входящих в ПО [10], путем учета межэлементных связей. В простейшем случае вход элемента S_k представляет собой множество X_i^l входных контактов с сигналами

$x_i^l(t), i = 1, 2, \dots, n$, а выход представляет множество Y_j^l выходных контактов с сигналами $y_j^l(t), j = 1,$

$2, \dots, m$ ($x_i^l(t) \in X_i^l, y_j^l(t) \in Y_j^l$). Если сигнал, выдаваемый на входе одного элемента, передать на вход другого элемента, то можно сконфигурировать элементарный канал сопряжения. В этом случае каждый элемент S_k^L можно охарактеризовать

множеством входов $[X_i^l]^n$ и выходов $[Y_j^l]^m$:

$$S_k^L = ([X_i^l]^n, Alg([X_i^l]^n, [Y_j^l]^m), [Y_j^l]^m), \quad (3)$$

с учетом ограничений, накладываемых на вид соединения элементарных каналов и Alg-алгоритма преобразования входных сигналов в выходные, поскольку наличие нескольких входов/выходов может сделать поведение элемента неопределенным. При этом с учетом ограничений может возникнуть ситуация, при которой появятся трудности сопряжения элементной базы вследствие ее неоднозначности по числу и неоднородности входов/выходов. Возникает необходимость введения оператора сопряжения, позволяющего осуществить взаимодействие между разнородными элементами ПО. Назо-

вем оператором сопряжения оператор соответствия входов $[X_i^i]^n$ и выходов $[Y_j^i]^m$:

$$Y_j^L = \varphi(X_i^L), \quad (4)$$

где соответствие входов и выходов не является взаимно однозначным. Тогда оператор сопряжения можно задать в виде матрицы смежности ориентированных графов, где вершины — контакты, а ребра — элементарные каналы, или в виде таблицы, в которой на пересечениях строк и столбцов располагаются номер элемента и номер контакта. Такое представление позволяет сформировать структуру связей между элементами системы, а также переходы из одного состояния в другое и соотношения:

$$\left. \begin{aligned} [X]^L &= \varphi_i^{-1} \{ [Y_j^i]^m \cap \varphi([X_i^i]^n) \}; \\ [Y]^L &= [Y_j^i]^m \cap \varphi([X_i^i]^n), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где φ_i^{-1} — обратный оператор, составляющий для каждого выхода $[Y_j^i]^m$ соответствующий вход $[X_i^i]^n$.

В этом случае синтез сопряженных элементов можно представить в виде абстрактной схемы функционирования ПО, переходы между входными и выходными воздействиями осуществляются под воздействием оператора сопряжения (4) и состояния элемента в момент времени T . Проблема построения реконфигурируемого ПО состоит в нахождении оптимального варианта из множества сценариев реконфигурации с учетом сопряжения элементов. Примем, что при реконфигурации ПО формируется новая топологическая структура из элементов, логических каналов, процессов и т. п. При этом возникает необходимость достижения заданных показателей качества функционирования ПО, причем показатели качества до реконфигурации должны соответствовать показателям качества после реконфигурации, т. е.

$$W_R(S_R) = \max_{i \in \Omega} W_i(S_i), \quad (6)$$

где $W_R(S_R)$ — выполнение целевой функции ПО при возникновении необходимости реконфигурации, S_R — множество структурно-функциональных элементов промышленного объекта, участвующих в реконфигурации.

Структурно-функциональная организация реконфигурированного пространства, содержащая конечное число элементов S , может элементарно взаимодействовать между элементами S_k^L , если возможно сопряжение элементов согласно условиям (3) и (5). В этом случае возникает необходимость поиска сценариев реконфигурации с учетом опти-

мизационных моделей и существующих ограничений (6). Тогда формирование такого сценария реконфигурации сводится к построению неориентированного графа $G_R(V, E)$, где V — множество вершин составных элементов, E — множество ребер, соответствующих множеству правил взаимодействия из множества неориентированных графов $G_I(V, E)$, определенных на множестве задач I , требующих решения с учетом заданных оптимизационных моделей. Сценарии реконфигурации образуют множество и отличаются последовательностью перебора конфигураций. Задачи поиска сценариев реконфигурации могут быть решены дополнением до остовного дерева, с помощью так называемого жадного алгоритма [11, 12], на основе генетических алгоритмов [13] и растущих пирамидальных сетей [14]. В рассматриваемом методе реконфигурации ПО с использованием аппарата кусочно-линейных агрегатов [12] одной из поставленных задач является обеспечение заданного уровня функционирования ПО путем формирования оператора сопряжения (4), позволяющего осуществить синтез элементов ПО.

Метод реконфигурации сложных объектов с применением аппарата кусочно-линейных агрегатов

Шаг 1. Декомпозиция множества структурно-функциональных элементов S_k с возможностью их ранжирования по значимости выполнения целевой функции

$$\gamma_{S_k} = \frac{C_i \gamma_i}{C_{\text{общ}} \gamma_P^L}, \quad (7)$$

где C_i — число состояний, для которых отсутствие элемента S_k приводит к снижению эффективности функционирования ПО; $C_{\text{общ}}$ — общее число состояний ПО.

Для этого определяются множества γ_P^L показателей значимости всех элементов при выполнении целевой функции (1) и показатель γ_i значимости каждого элемента.

Шаг 2. Формируется множество нарушений функционирования ПО, характеризующее изменения его структурных и функциональных характеристик и состоящее из подмножества нарушений операционного цикла: $o(t, c, u) \rightarrow o(t, c, u)' \rightarrow o(t, c, u)'' \dots \in O(t, c, u) \subseteq O_{(1, \dots, m)}$.

Шаг 3. Генерация вариантов множества $G_R(V, E)$ — вариантов реконфигурации структурно-функциональной организации ПО:

3.1. Определение вероятностного пространства $P(t)$ нарушений функционирования ПО (из шага 1). В данном случае C — множество состояний соответствующего элемента S_k , а $P(t)$ — вероятность нарушения его функционирования.

3.2. Определение подмножества элементов S_k (из шага 1), которые могут участвовать в перестроении критически важных процессов при нарушении функционирования ПО. При этом подмножество элементов S_k должно позволять осуществить выбор минимум из двух вариантов структурных элементов с учетом их значимости (7) и интенсивности отказа элемента.

3.3. Формирование множества согласующих правил, позволяющих задавать отношения предпочтения $(\phi^P) \in P(t)$ в условиях протекания элементарных событий.

3.4. Построение множества сценариев реконфигурации для каждого варианта нарушения функционирования:

$$G_R = (G_1(V(S_{i1}), E(\phi^P, P_{S_{1k}}, P_o)); \\ (G_2(V(S_{i2}), E(\phi^P, P_{S_{2k}}, P_o)); \dots; \\ (G_m(V(S_{ik}), E(\phi^P, P_{S_{K}}, P_o)). \quad (8)$$

Шаг 4. Коррекция целевых функций W_i ПО (1) путем построения множества оптимальных решений достижения цели с помощью следующего:

4.1. Мониторинга показателей качества функционирования и определения момента времени и структурного элемента, требующего оптимизации.

4.2. Исключения структурного элемента, требующего оптимизации процесса из структурно-функциональной схемы.

4.3. Исключения межструктурных связей, требующих оптимизации и запрета доступа к ним.

4.4. Расчета возможных путей реконфигурации с требуемыми структурно-функциональными показателями качества, с учетом сценариев реконфигурации.

Шаг 5. Поиск оптимального варианта реконфигурации из множества (8) с целью сохранения наиболее приоритетной функции выполнения целевой задачи (1).

Шаг 6. Коррекция стратегических целей путем построения множества оптимальных решений достижения цели при отклонении показателей качества функционирования ПО (повторение пп. 4.1—4.4 для стратегических задач, показателей мониторинга, пространства проблемных ситуаций).

Применение метода на примере реконфигурации оснастки "токарный патрон"

Метод реконфигурации с использованием аппарата кусочно-линейных агрегатов был применен при изготовлении детали "переходный фланец" к токарному патрону для станка с ЧПУ. В результате изготовления этой детали произошел износ оснастки зажима детали на обрабатываемом станке.

На шаге 1 декомпозиция множества структурно-функциональных оснасток, имевшихся на предприятии, с аналогичной значимостью выполнения целевой функции показала трудности при ее замене на оснастку из используемых на предприятии приспособлений и невозможность изготовления силами предприятия.

На шаге 2 формирование множества нарушений функционирования, характеризующих изменения структурных и функциональных параметров процесса изготовления детали при отсутствии оснастки, позволило выделить показатель стоимостных и временных потерь при простое оборудования. Оценка простоя по времени проводилась из расчета времени, затрачиваемого на обнаружение неполадки, на поиск новых вариантов, на поставку и установку оснастки на станок. Расчеты показали, что минимальное время простоя оборудования составляет 80 дней. В этом случае потери от простоя одного станка за указанный промежуток времени составили более 2,7 млн руб.

На шаге 3 оценка экономических потерь позволила найти диапазон возможных затрат на покупку новой оснастки, но не превышающих ущерб от простоя, и осуществить генерацию множества вариантов оснасток для закупки. В дальнейшем было проведено формирование множества согласующих правил, позволяющих задавать отношения предпочтения с учетом стоимостных затрат, что обеспечивает построение множества сценариев реконфигурации для каждого варианта технологии изготовления детали, с учетом выбранной оснастки и ее характеристик. Сформированное множество вариантов оснасток согласно декомпозиции структурно-функциональных показателей позволяет закупить необходимую для изготовления детали оснастку и осуществить коррекцию целевых задач и технологий изготовления детали при применении новой оснастки. Экономический эффект от использования новой оснастки с учетом затрат на ее приобретение составил 35 тыс. руб. за одну единицу оснастки.

На шагах 4 и 5 в процессе установки оснастки для зажима детали было выявлено несоответствие ее состава заявленному поставщиком, в частности отсутствие элементов крепления к шпинделю станка, которые не предусмотрены конструкцией оснастки, что не допускает возможности работы на оборудовании. Это привело к необходимости либо закупки новой оснастки, либо доработки существующей. Для доработки элементов оснастки и устранения нарушений был проведен анализ структурно-функциональной конструкции оснастки с учетом значимости нарушений (согласно шагу 1). Это позволило осуществить генерацию множества вариантов реконфигурации структурно-функциональной схемы оснастки (в частности по посадочным размерам), с формированием шпинделя крепе-

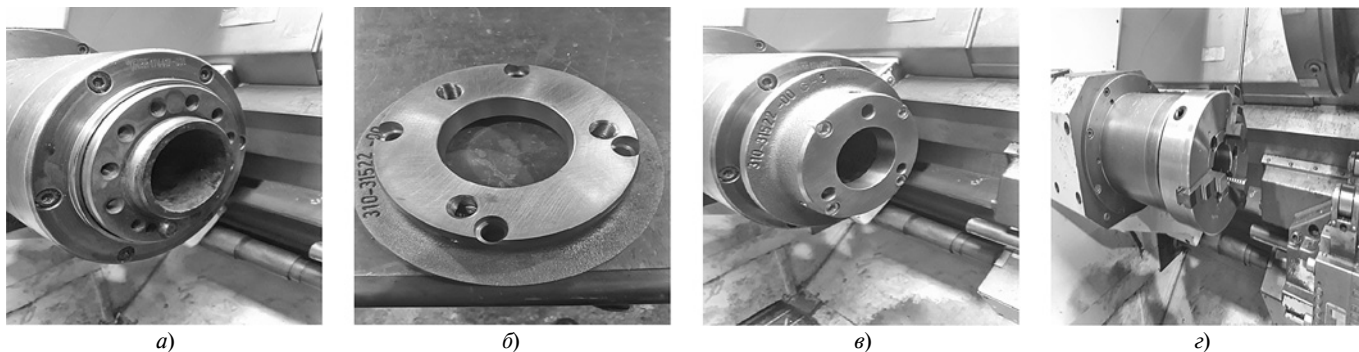


Рис. 1. Процесс реконфигурации оснастки:

а — шпиндель станка без оснастки; *б* — реконфигурация оснастки по посадочным размерам; *в* — установка оснастки на станок; *г* — установленный на шпиндель станка токарный патрон с приспособлением

ния. Эти варианты можно использовать при перестроении критически важных элементов оснастки без ухудшения ее характеристик (рис. 1).

Построение множества сценариев реконфигурации доработки оснастки позволило сформировать расчет отверстий крепления согласно требованиям по надежности изделия и координации отверстий относительно базовых поверхностей станка и выбрать оптимальный вариант доработки. Это позволило оценить затраты на доработку оснастки из расчета трехдневных временных затрат при расчете стоимости простоя оборудования (рис. 2).

Таким образом, метод реконфигурации с использованием аппарата кусочно-линейных агрегатов позволил осуществить сопряжение оснастки с элементами станка согласно необходимым структурно-функциональным характеристикам без потерь и внесений изменений в технологический процесс изготовления, стоимостных и временных затрат в случае необходимости покупки новой оснастки с получением экономического эффекта в

5,2 млн руб. на одну единицу оборудования, из расчета его простоя в 160 дней.

Дальнейшее исследование метода структурно-функциональной реконфигурации целесообразно осуществлять с применением кусочно-линейных агрегатов с перестраиваемой структурой, позволяющих проводить реконфигурацию внутренних состояний элементов и исследовать функционирование элементов в условиях переменной структурно-функциональной организации ПО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Новиков А. Н., Нечай А. А., Малахов А. В. Математическая модель обоснования вариантов реконфигурации распределенной автоматизированной контрольно-измерительной системы // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2016. № 1–2. С. 56–59.
2. Метод отказоустойчивого управления нелинейными динамическими системами: логико-динамический подход / А. Е. Шумский, А. Н. Жирабок, Е. Ю. Бобко // Проблемы управления. 2010. № 2. С. 11–18.
3. Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем / В. Н. Буков, А. М. Бронников, А. М. Агеев, И. Ф. Гамаюнов // Автоматика и телемеханика. 2017. № 9. С. 67–83.
4. Никищенков С. А., Асабин В. В., Иващенко М. Ф. Многоаспектная теоретико-множественная операционно-событийная метамодель реконфигурируемых технологических процессов // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6 (72). С. 54–60.
5. Савкин Л. В. Регенеративные электронные системы в космических системах и комплексах // Вестник кибернетики. 2015. № 2 (18). С. 3–32.
6. Mesoscopic supply chain simulation / Til Hennies, Tobias Reggelin, Juri Tolujew, Pierre-Alain Piccut // Journal of Computational Science. V. 5. Is. 3. 2014. P. 463–470.
7. Реконфигурация системы с дефектами на основе логико-динамического подхода / А. Н. Жирабок, А. Е. Шумский, Е. Ю. Бобко, А. В. Зуев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2017. Т. 5. № 2. С. 49–55. DOI: 10.24892/RIJE/20170208.
8. Левин М. Ш. О реконфигурации решений в комбинаторной оптимизации // Информационные процессы. 2016. Т. 16. № 4. С. 414–429.

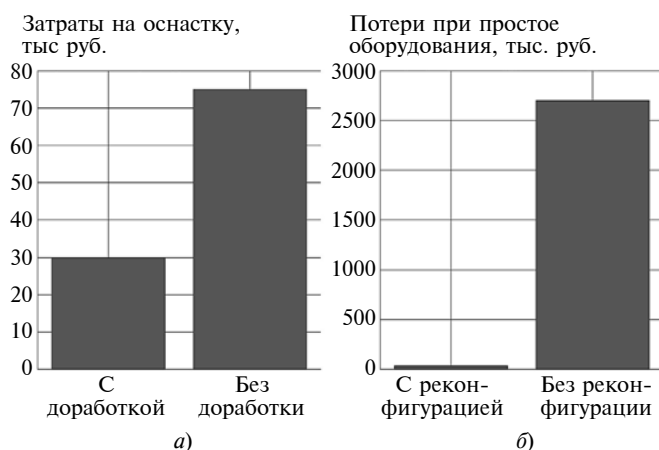


Рис. 2. Экономическая эффективность метода реконфигурации:

а — затраты на оснастку без доработки и с доработкой; *б* — потери при простое оборудования без реконфигурации оснастки и с реконфигурацией

А. С. КЛИМОВ, канд. техн. наук, А. К. КУДИНОВ, В. С. КЛИМОВ, канд. техн. наук (Тольяттинский ГУ),
e-mail: KlimovTGU@yandex.ru

Влияние параметров сети на точность управления и диагностики контактной сварки

Выполнена оценка влияния паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление и индуктивность) на точность диагностики контактной сварки. Выполнена оценка эффективности различных алгоритмов управления при работе в условиях колебаний напряжения питающей сети. Представлена методика определения паразитных параметров сети.

Ключевые слова: контактная сварка, автоматизация, контроль и диагностика.

The influence of parasitic parameters of the power supply network (active resistance and inductance) on the accuracy of resistance welding diagnostics is estimated. Evaluation of the effectiveness of various control algorithms when operating under conditions of fluctuations in the supply voltage is performed. The methodic for determining the parasitic parameters of the network is presented.

Keywords: resistance welding, automation, control and diagnostics.

Колебания напряжения питающей сети — главное из возмущений, нарушающих формирование соединения и обуславливающих использование систем автоматического управления при контактной сварке [1–3]. Отклонение напряжения $U_{c.xx}$ сети на холостом ходу от номинального напряжения $U_{c.н}$ зависит от загруженности сети другими потребителями. Скачкообразное снижение напряжения $U_{c.св}$ сети во время сварки относительно

напряжения $U_{c.xx}$ (рис. 1) объясняется действием внутренних параметров сети.

Влияние параметров сети проявляется не только в снижении фактического напряжения $U_{c.св}$, подаваемого на контактор и первичную обмотку трансформатора контактной машины, но и в отставании по фазе напряжения $U_{c.св}$ от напряжения $U_{c.xx}$. Это может привести к снижению точности измерения временных интервалов и качества регулирования энергетических параметров контактной сварки (ток,

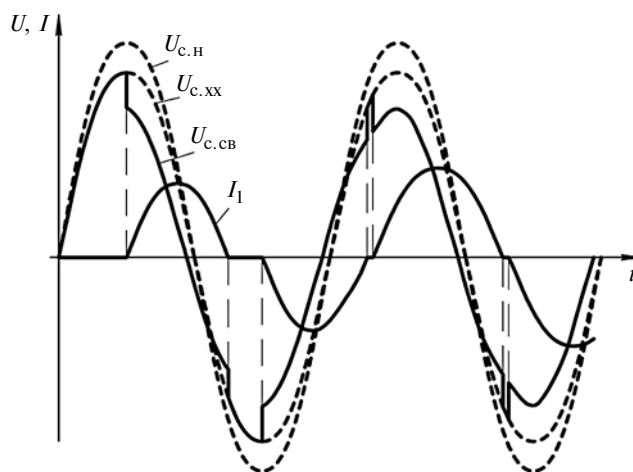


Рис. 1. Осциллограммы напряжений $U_{c.xx}$, $U_{c.н}$, $U_{c.св}$ и первичного тока I_1



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 40)

9. **Fatkieva R., Krupina A.** Enterprise Information Security Assessment Using Balanced Scorecard // Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2019. V. 641. Springer, Cham. P. 1147–1157. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3-120.

10. **Бусленко Н. П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.

11. **Лившиц Е. Д.** Реализуемость жадных алгоритмов // Труды института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16. № 4. С. 228–236.

12. **Овчинников В. Г.** Жадные алгоритмы для аддитивных процессов // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Третьей Всероссийской научной конференции. 2006. С. 70–74.

13. **Горбийчук М. И., Пашковский Б. В.** Оптимизация параллельного алгоритма синтеза модели оптимальной сложности на принципах генетических алгоритмов // Computer Sciences and Telecommunications. 2016. № 1 (47). С. 23–34.

14. **Гладун В. П.** Растущие пирамидальные сети // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 1. С. 30–40.

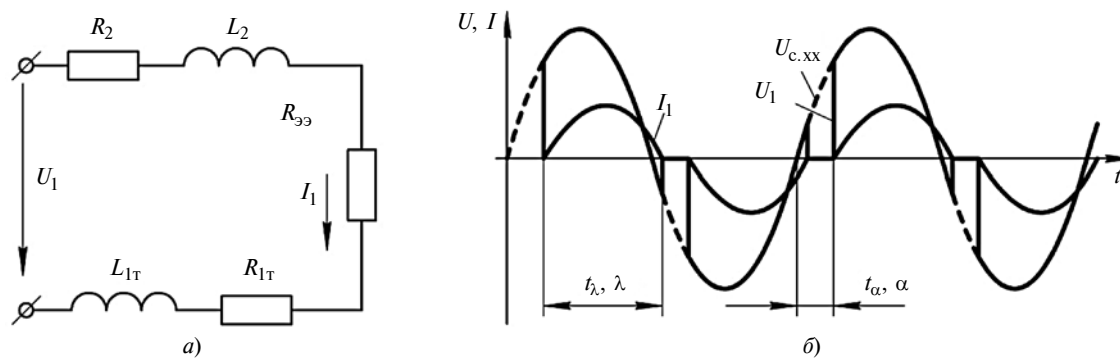


Рис. 2. Упрощенная схема замещения (а) и диаграмма работы (б) контактной сварочной машины

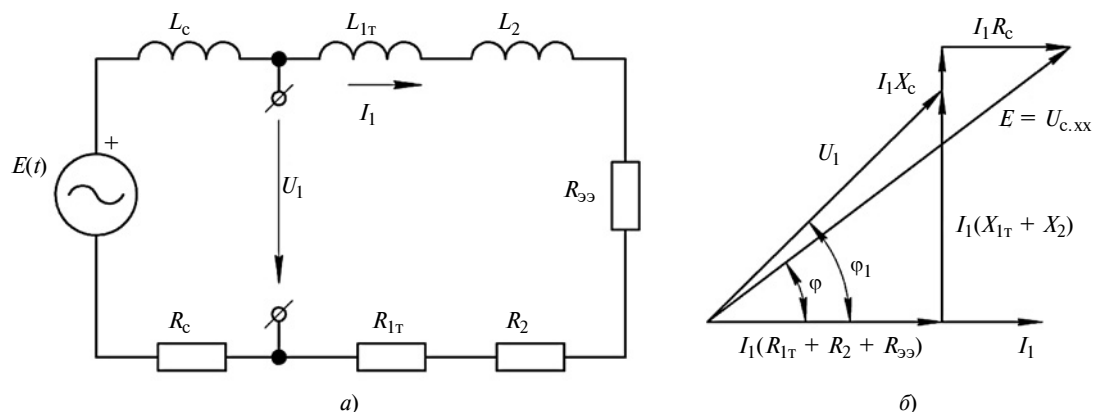


Рис. 3. Упрощенная схема замещения (а) и векторная схема (б) при однофазном подключении контактной машины к неидеальной сети

сопротивление участка электрод—электрод, напряжения на электродах, энерговыделение).

Для электрических расчетов при контактной сварке применяют упрощенную схему замещения [4] из последовательно соединенных активного сопротивления R_{1T} и индуктивности L_{1T} первичной обмотки сварочного трансформатора, приведенных активного сопротивления R_2 и индуктивности L_2 вторичного контура, приведенного сварочного сопротивления $R_{3Э}$ (рис. 2, а). К этим сопротивлениям прикладывается первичное напряжение U_1 , которое при открытом контакторе составляет $U_1 = U_{c,xx}$, а при закрытом — $U_1 = 0$ (рис. 2, б). Первичный ток I_1 и вторичный ток I_2 вычисляют по формулам переходного процесса [5]. Энергетические параметры контактной сварки и регулировочные характеристики рассчитывают по коэффициенту мощности ($\cos\varphi$), оперативное отслеживание которого осуществляется измерением временных интервалов t_α и t_λ , соответствующих углу α регулирования и углу λ проводимости контактора [6—8]. Временной интервал t_α отсчитывают с момента перехода сетевого напряжения через ноль, а временной интервал t_λ соответствует длительности импульса тока I_1 (см. рис. 2, б).

На практике при сварке на входы контактной машины вместо напряжения $U_{c,xx}$ сети на холостом ходу подают напряжение $U_{c,св}$ сети под нагрузкой,

которое отличается от напряжения $U_{c,xx}$ не только величиной, но и фазой (см. рис. 1).

Если в упрощенную одноконтурную схему замещения (см. рис. 2, а) ввести активное сопротивление R_c и индуктивность L_c сети (рис. 3, а), то возникающую погрешность можно демонстрировать векторной схемой напряжений для однофазного включения (рис. 3, б), где I_1 — вектор первичного тока (в горизонтальном направлении); U_1 — первичное напряжение сварочной машины; E — напряжение сети на холостом ходу; X_{1T} , X_2 и X_c — реактивные сопротивления, возникающие в результате индуктивности L_{1T} первичной обмотки сварочного трансформатора, индуктивности L_2 вторичного контура и индуктивности L_c сети. Угол φ_1 можно найти по осциллограммам тока и напряжения, он определяет коэффициент мощности сварочной машины без учета сопротивления сети. Однако временные интервалы (например, длительности первичного и вторичного тока при неполнофазном включении) определяются совокупным влиянием и параметров сети, и параметрами сварочной машины. Регулировочные характеристики и коэффициент мощности всего сварочного контура определяются углом φ , нахождение которого из осциллограмм тока и напряжения затруднено.

Для моделирования электрических процессов с учетом активного сопротивления R_c и индуктив-

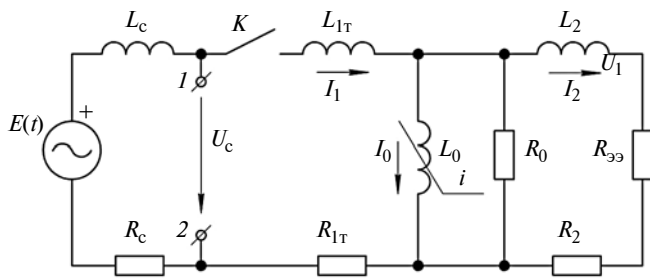


Рис. 4. Расчетная схема замещения контактной машины при подключении к неидеальной сети

ности L_c сети на основании работы [9] предложена схема замещения (рис. 4), в которой L_0 и R_0 — приведенные к первичной обмотке параметры сердечника трансформатора; $E(t)$ — напряжение холостого хода питающей сети. Напряжение U_c , используемое регулятором сварки в качестве опорного, снимается с клемм 1 и 2. Изменение состояния тиристорного контактора (от выключенного к включенному и обратно) происходит мгновенно и моделируется соответствующим положением ключа K . Математическое описание электрических процессов в данной схеме выполнено методом переменных состояния [10], позволяющим получить математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Изменение положения ключа K реализовано методом припасовывания [11] посредством передачи начальных условий для численного интегрирования.

В качестве переменных состояния выбраны токи I_1 , I_2 , I_0 (см. рис. 4), являющиеся соответственно токами индуктивностей $L_{1T} + L_c$, L_2 и L_0 . Метод переменных состояния приводит к следующим системам уравнений:

для включенного тиристорного контактора:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_0 + R_c + R_{1T}}{L_c + L_{1T}} & \frac{R_0}{L_c + L_{1T}} & \frac{R_0}{L_c + L_{1T}} \\ \frac{R_0}{L_2} & -\frac{R_0 + R_2 + R_{\text{э\text{э}}}}{L_2} & -\frac{R_0}{L_2} \\ \frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{L_c + L_{1T}} E(t); \quad (1)$$

для выключенного тиристорного контактора:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_0 + R_2 + R_{\text{э\text{э}}}}{L_2} & -\frac{R_0}{L_2} \\ 0 & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

При разомкнутом ключе K первичный ток $I_1 = 0$, а опорное напряжение — напряжению холостого хода $U_c = E(t)$.

При замыкании ключа K опорное напряжение $U_{c,cb}$ сети под нагрузкой можно рассчитать как разность между напряжением $E(t)$ холостого хода и падением напряжения на элементах R_c и L_c :

$$U_{c,cb}(t) = E(t) - I_1 R_c - L_c \frac{dI_1}{dt}. \quad (3)$$

Из выражения (1) следует:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{L_c + L_{1T}} [-(R_0 + R_c + R_{1T})I_1 + R_0 I_2 + R_0 I_0 + E(t)]. \quad (4)$$

С учетом выражений (3) и (4) напряжение сети под нагрузкой рассчитываем по формуле

$$U_{c,cb}(t) = \left(1 + \frac{L_c}{L_c + L_{1T}} \right) E(t) + \left[\frac{(R_0 + R_c + R_{1T})L_c}{L_c + L_{1T}} - R_c \right] I_1 - \frac{R_0 L_c}{L_c + L_{1T}} (I_2 + I_0). \quad (5)$$

Формула (5) была использована для расчета переходного процесса при включении машины МТ-4019 на последней ступени ($K_T = 35$) при угле регулирования $\alpha = 60^\circ$ эл. (в первом полупериоде принято $\alpha = 90^\circ$ эл.). Параметры сети: $R_c = 0,14$ Ом; $L_c = 0,26$ мГ; $\cos\varphi = 0,8$.

На рис. 5 представлены расчетные осциллограммы сетевого напряжения при включении контактной машины МТ-4019 на неидеальную сеть, которые показывают провалы, соответствующие моменту коммутации тириستоров контактора. Эти же провалы наблюдаются и на осциллограммах тока и напряжения, полученных с помощью специально-го регистратора сварки РКДП-0401.

Таким образом, корректное задание угла α открытия тиристоров возможно только на первом полупериоде, когда отсчет времени t_α начинается с момента перехода через ноль напряжения $E(t)$ сети на холостом ходу. На последующих периодах отсчет интервала времени t_α начинается с момента перехода через ноль напряжения $U_{c,cb}$ сети под на-

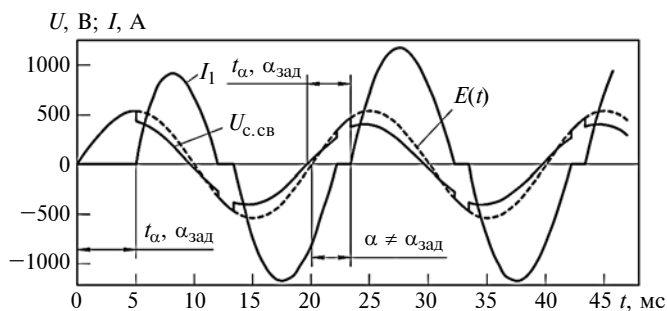


Рис. 5. Расчетные осциллограммы сетевого напряжения U_c и первичного тока I_1 при подключении контактной машины МТ-4019 к неидеальной сети

грузкой, поэтому задаваемый угол $\alpha_{зад}$ открытия тиристоров будет отличаться от истинного значения α на величину поправки $\Delta\alpha$.

Современное измерительное оборудование позволяет с высокой точностью зарегистрировать и сохранить для последующего анализа электрические характеристики работы контактной сварочной машины. Так, регистратор сварочных процессов РКДП-0401 имеет несколько аналоговых входов и быстродействующий АЦП, управляется с персонального компьютера и сохраняет информацию в цифровом виде, что удобно для просмотра и анализа с помощью программы визуализации. Этого оборудования достаточно, чтобы определить все статические (не зависящие от свариваемых деталей) параметры контактной сварочной машины.

При неидеальной питающей сети измеренное (наблюдаемое на осциллограммах) значение $\alpha_{зад}$ отличается от истинного значения α на величину $\Delta\alpha$:

$$\alpha = \alpha_{зад} - \Delta\alpha. \quad (6)$$

Поправка $\Delta\alpha$ определяется по формулам (1)–(6). Для $R_c = 0,14$ Ом, $L_c = 0,26$ мГ при полной нагрузке по мощности ($Q = 100\%$) машины МТ-4019 получены зависимости поправки $\Delta\alpha$ от истинного угла α регулирования и $\cos\varphi$ (рис. 6, а). При снижении мощности Q сварочной машины первичный ток I_1 уменьшается, что делает менее заметным влияние паразитных параметров сети на погрешность при анализе осциллограмм тока и напряжения (рис. 6, б).

В зависимости от режима сварки и фазового регулирования поправка $\Delta\alpha$ может составлять от десятых долей до единиц электрического градуса. Если поправку $\Delta\alpha$ не учитывать при анализе осциллограмм тока и напряжения, то точность расчетного определения коэффициента $\cos\varphi$ мощности может существенно снизиться. Так, при $\Delta\alpha = 1^\circ$ эл. рассчитанный коэффициент мощности будет меньше действительного на 1÷10 % (рис. 7, а), при $\Delta\alpha = 3^\circ$ эл. погрешность может достигать 20 % и более (рис. 7, б). Влияние поправки $\Delta\alpha$ на точность расчета $\cos\varphi$ меньше при малой глубине фазового регулирования и значениях $\cos\varphi$, близких к единице.

Оценивали влияние погрешности $\Delta\alpha$ на точность параметрической стабилизации тока [12], реализованной в регуляторах контактной сварки РКМ-803 и РКМ-804, в которых угол $\alpha_{зад}$ открытия тиристоров задается в зависимости от опорного напряжения $U_{оп}$ сети (принимается $U_{оп} = 320$ В), измеренного напряжения $U_{с.св}$ сети под нагрузкой и показателя нагревания N (отношение действующего тока к полнофазному):

$$\alpha_{зад} = \frac{U_{оп} N}{U_{с.св} b_1} - \frac{b_0}{b_1}. \quad (7)$$

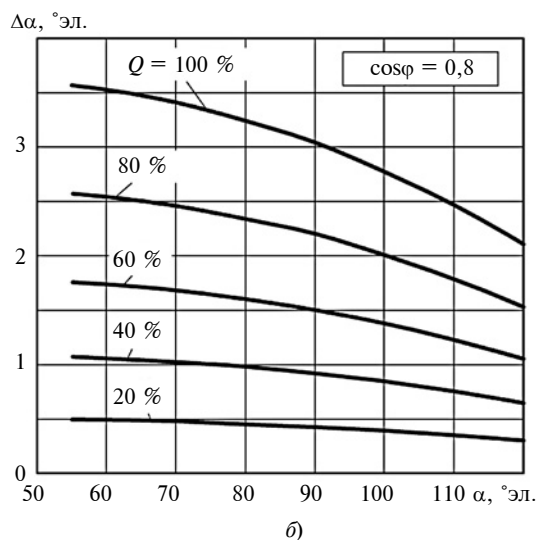
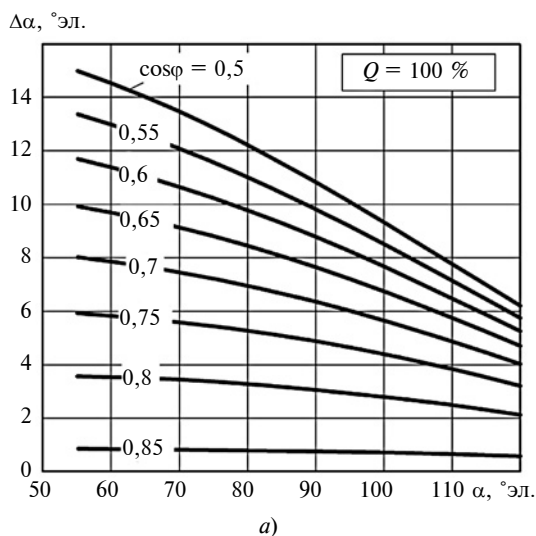


Рис. 6. Зависимости поправки $\Delta\alpha$ от угла α регулирования при полной нагрузке ($Q = 100\%$) машины для разных коэффициентов $\cos\varphi$ (а) и при разных нагрузках для $\cos\varphi = 0,8$ (б)

Здесь коэффициенты b_0 и b_1 регулировочной характеристики рассчитывают в зависимости от коэффициента $\cos\varphi$ мощности нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 2,562 - 2,189 \cos\varphi + 0,9642 \cos^2\varphi; \\ b_1 &= -1,029 + 0,9184 \cos\varphi - 0,3681 \cos^2\varphi. \end{aligned} \right\} (8)$$

Погрешность стабилизации в этом случае характеризуется отношением действительного показателя N нагрева к заданному $N_{\text{зад}}$:

$$\frac{N}{N_{\text{зад}}} = \frac{(\alpha_{\text{зад}} - \Delta\alpha)b_1 + b_0}{\alpha_{\text{зад}}b'_1 + b'_0},$$

где коэффициенты b_1 и b_0 , b'_1 и b'_0 вычисляем согласно формулам (8) для действительного ($\cos\varphi$) и расчетного ($\cos\varphi'$) коэффициентов мощности нагрузки, последний вычисляем по временным интервалам импульса тока (угол $\alpha_{\text{зад}}$ и продолжительность λ включения тиристоров).

Из зависимостей, представленных на рис. 8, а, построенных для углов включения тиристоров $\alpha_{\text{зад}} = 60 \div 120^\circ$ эл. и коэффициента мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,6$ при разных значениях поправки $\Delta\alpha$, видно, что действительная величина N превышает заданную $N_{\text{зад}}$ не более чем на 15%. Таким образом, фазовый сдвиг наблюдаемого при сварке напряжения $U_{\text{с.св}}$ сети относительно напряжения

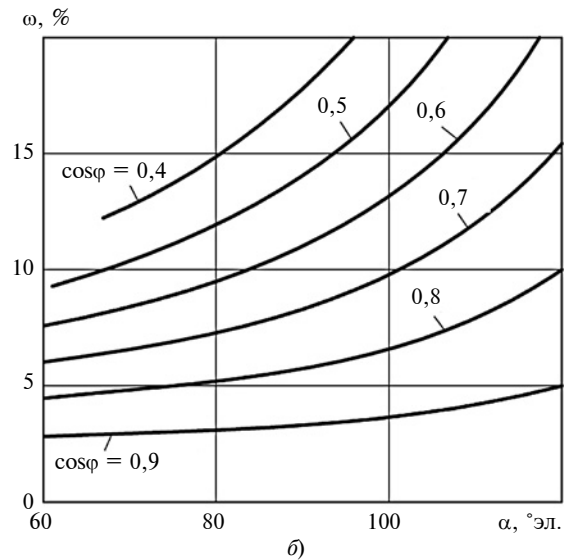
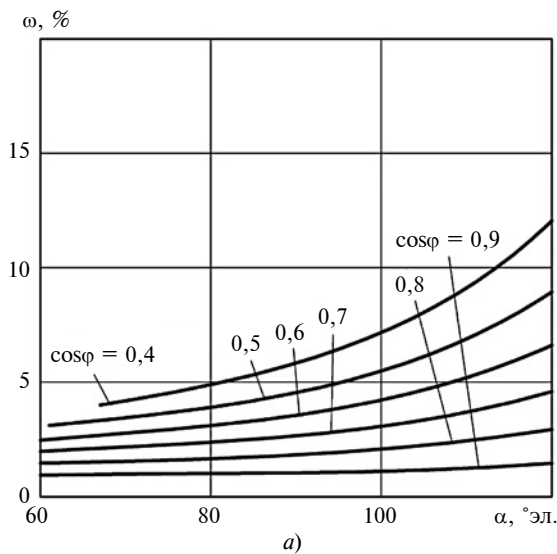


Рис. 7. Зависимости относительной погрешности ω расчетного $\cos\varphi$ от угла α регулирования при $\Delta\alpha = 1^\circ$ эл. (а) и $\Delta\alpha = 3^\circ$ эл. (б)

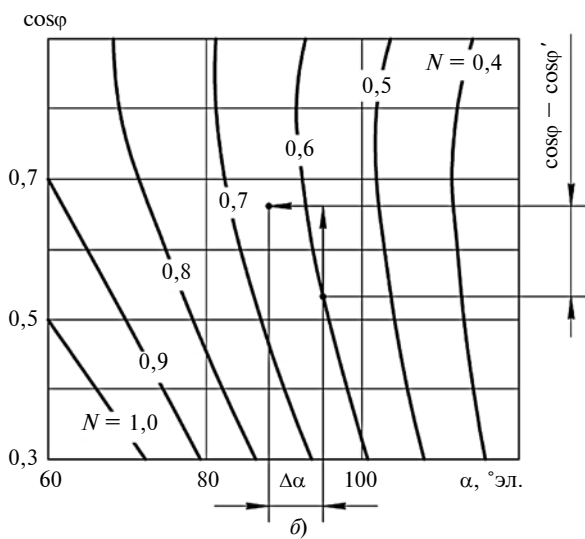
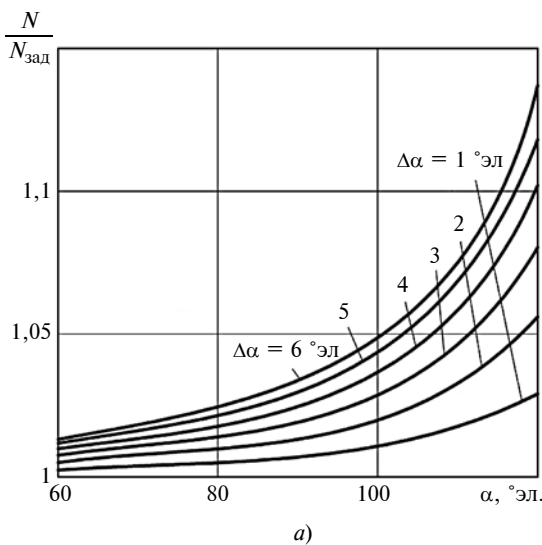


Рис. 8. Зависимость отношения $N/N_{\text{зад}}$ от угла α регулирования для разных значений $\Delta\alpha$ (а) и диаграмма значений N в зависимости от коэффициента $\cos\varphi$ (б)

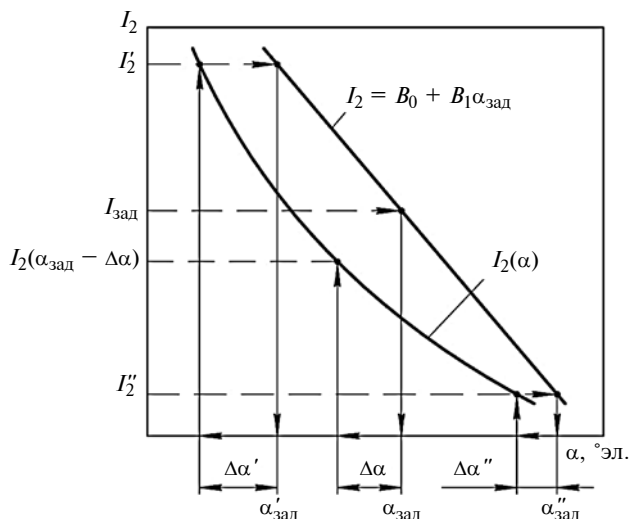


Рис. 9. Расчетные и действительные значения вторичного тока I_2 при фазовом регулировании в условиях неидеальной сети

$U_{с.хх}$ сети на холостом ходу не нарушает параметрической стабилизации сварочного тока по напряжению сети.

Это подтверждается диаграммой (рис. 8, б) значений N в зависимости от коэффициента $\cos\varphi$ мощности нагрузки и угла α включения тиристорov. Отрицательная поправка $\Delta\alpha$ уменьшает расчетное значение $\cos\varphi'$ относительно действительного значения $\cos\varphi$. Однако уменьшение $\cos\varphi$ на поправку $\Delta\alpha$ повышает действительный параметр N относительно заданного.

Количественное задание и поддержание вторичного тока I_2 выполняют по регулировочной характеристике

$$I_2 = B_0 + B_1\alpha. \quad (9)$$

Если пренебречь изменением при сварке коэффициента $\cos\varphi$, то коэффициенты B_0 и B_1 формулы (9) можно определить экспериментально измерением вторичного тока (I_2' и I_2'') при включении на двух разных углах $\alpha'_{зад}$ и $\alpha''_{зад}$ (рис. 9). В этом случае заданный ток $I_{зад}$ должен достигаться при $\alpha_{зад}$. При неидеальной сети зависимость $I_2(\alpha)$ вторичного тока I_2 от угла α включения тиристорov носит нелинейный характер. Развиваемый при этом ток $I_2(\alpha_{зад} - \Delta\alpha)$, соответствующий действительному углу включения тиристорov, будет меньше заданного тока $I_{зад}$.

Таким образом, в условиях неидеальной сети задание и стабилизация тока с использованием регулировочной характеристики (9) выполняется с существенной погрешностью, которая хоть и уменьшенная, но присутствует при расчете коэффициентов B_0 и B_1 для каждого периода на основании измеренных в предыдущем периоде параметров фазового регулирования.

Точность задания и стабилизации вторичного тока I_2 можно существенно повысить корректированием угла $\alpha_{зад}$ в зависимости от тока I_2' и угла $\alpha'_{зад}$ включения в предыдущем периоде [13].

Количественную оценку поправки $\Delta\alpha$ можно выполнить, если определены эквивалентные параметры сети — активное сопротивление R_c и индуктивность L_c , не связанные с параметрами контактной машины, а зависящие от длины и конструкции силовых кабелей, мощности трансформаторных подстанций, типов коммутирующей аппаратуры, качества монтажа и т. д. Значения R_c и L_c целесообразно определять экспериментально по месту установки контактной машины.

На рис. 10 показаны осциллограммы тока и напряжения при однофазном включении. Для подавления переходного процесса в сварочном трансформаторе момент t_k коммутации тиристорного контактора соответствует максимуму мгновенного напряжения сети на холостом ходу, т. е. угол первого включения тиристорov составляет $\alpha = 90^\circ$ эл. По прошествии 1—2 периода кривые тока и напряжения принимают строго синусоидальную форму, что позволяет с высокой точностью измерить временную задержку $t_{\varphi 1}$ и соответствующий ей угол φ_1 отставания тока от напряжения при однофазном включении.

По осциллограммам тока и напряжения в режиме однофазного включения определяют: до момента коммутации — действующее напряжение $U_{с.хх}$ сети; по прошествии 1—2 периода после коммутации — действующее напряжение $U_{с.св}$ сети под нагрузкой и первичный ток I_1 , угол φ_1 отставания тока от напряжения; в момент коммутации — провал напряжения ΔU и скорость dI_1/dt нарастания первичного тока.

Поскольку первичный ток I_1 в момент коммутации отсутствует, падение напряжения на R_c (см. рис. 3) равно нулю. Поэтому наблюдаемый провал

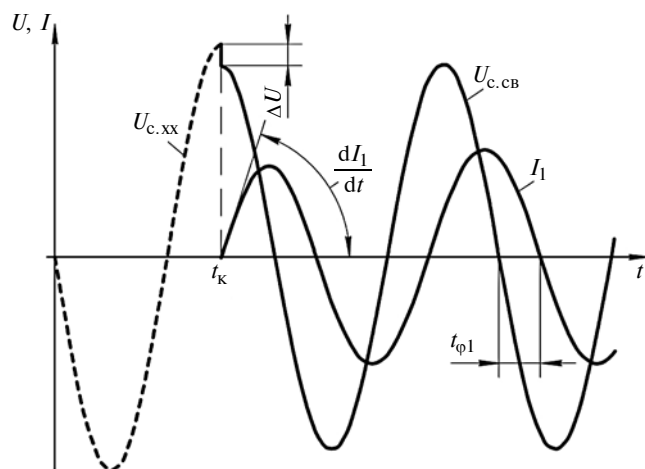


Рис. 10. Осциллограммы тока и напряжения при однофазном включении

ΔU первичного напряжения целиком обусловлен падением напряжения на индуктивности L_c сети:

$$\Delta U = L_c \frac{dI_1}{dt}. \quad (10)$$

Согласно формуле (10) индуктивность L_c сети рассчитывают по провалу ΔU напряжения и скорости dI_1/dt нарастания первичного тока I_1 :

$$L_c = \Delta U / \frac{dI_1}{dt}. \quad (11)$$

Активное сопротивление сети составит:

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{U_{c.xx}}{I_1}\right)^2 - \left(\frac{U_{c.cb}}{I_1} \sin \varphi_1 + 2\pi f_c L_c\right)^2} - \frac{U_{c.cb}}{I_1} \cos \varphi_1, \quad (12)$$

где f_c — частота сети.

Измеряли паразитные параметры R_c и L_c сети в лаборатории контактной сварки с использованием контактной машины МТ-4019, регулятора РМС-24 и регистратора сварочных процессов РКДП-0401. Выполняли включение контактной машины в режиме короткого замыкания, добиваясь настройкой регулятора полнофазного включения (в первом периоде регулятор автоматически задает угол регулирования $\alpha = 90^\circ$ эл.). Режим короткого замыкания характеризуется наибольшим фазовым сдвигом φ_1 и минимальным током намагничивания, что положительно сказывается на точности определения параметров сети. При выборе ступени трансформатора следует учитывать, что, хотя она и не имеет принципиального значения, но чем больше первичный ток I_1 , тем выше точность определения параметров сети, поэтому лучше эксперимент выполнять на малом коэффициенте трансформации, который в нашем случае составляет $K_T = 70$ (восьмая ступень).

С помощью регистратора РКДП-0401 снимали осциллограммы первичного тока I_1 и напряжения U_c сети. Напряжение сети на холостом ходу $U_{c.xx} = 380$ В, под нагрузкой — $U_{c.cb} = 343$ В; провал напряжения в момент коммутации $\Delta U = 39$ В. Установившийся первичный ток полнофазного включения $I_1 = 258,3$ А, скорость нарастания первичного тока $dI_1/dt = 148$ кА/с, угол отставания тока от напряжения $\varphi_1 = 61,0^\circ$ эл. Расчет по формулам (11) и (12) получено: $R_c = 141$ мОм, $L_c = 0,263$ мГн.

Таким образом, в формировании кривых тока и напряжения при контактной сварке принимают участие паразитные параметры питающей сети (активное сопротивление R_c и индуктивность L_c), влияющие на эффективность диагностики и алгоритмов управления. При этом фактический угол α

регулирования отличается от наблюдаемого угла $\alpha_{зад}$, измеряемого по осциллограммам тока и напряжения, а погрешность расчетного коэффициента мощности составляет $1 \div 10$ % в зависимости от параметров режима и питающей сети. Минимальная погрешность имеет место при малой глубине фазового регулирования и значениях $\cos \varphi$, близких к единице.

При работе регулятора в режиме параметрической стабилизации тока по напряжению сети погрешностью задания угла регулирования можно пренебречь. При работе регулятора в режиме поддержания вторичного тока следует отдавать предпочтение алгоритмам, корректирующим параметры фазового регулирования в зависимости от измеренного в предыдущем периоде тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Гладков Э. А., Анциборов А. Н., Климов А. С.** Идентификация технологического процесса контактной сварки как объекта управления в условиях массового производства узлов кузова автомобиля // Сварка и Диагностика. 2020. № 6. С. 26—31.
2. **Управление** контактной сваркой в условиях возмущений / Анциборов А. Н., Климов А. С., Климов В. С., Кудинов А. К. // Сварочное производство. 2019. № 4. С. 43—45.
3. **Климов А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 216 с.
4. **Рыськова З. А., Федоров П. Д., Жемерева В. И.** Трансформаторы для электрической контактной сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 424 с.
5. **Оборудование** для контактной сварки: справочное пособие / под ред. В. В. Смирнова. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 848 с.
6. **Продолжительность** включенного состояния тиристорных как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой / А. С. Климов, А. К. Кудинов, А. А. Герасимов, А. Н. Анциборов // Сварочное производство. 2009. № 2. С. 17—22.
7. **А. с. 1281358 СССР:** МПК4 В 23 К 11/24. Способ определения коэффициента мощности полнофазного включения тока при контактной точечной сварке однофазным током.
8. **Управление** током при контактной сварке / А. С. Климов, А. Н. Анциборов, В. С. Климов, А. К. Кудинов // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 75—79.
9. **Певчев В. П., Кудинов А. К.** Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. 2012. № 3. С. 32—36.
10. **Чуа Л. О., Лин Пен-Мин.** Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. М.: Энергия, 1980. 640 с.
11. **Чиженко И. М., Руденко В. С., Сенько В. И.** Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1974. 430 с.
12. **А. с. 1355409 СССР:** МПК В23К 11/24. Способ стабилизации сварочного тока при контактной сварке с тиристорным управлением.
13. **Управление** током при контактной сварке / А. С. Климов, А. Н. Анциборов, В. С. Климов, А. К. Кудинов // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 75—79.

А. Л. ВОРОНЦОВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: mt13@bmstu.ru

Исследование штамповки неравнополочных швеллеров. Часть 4. Деформированное состояние заготовки при выдавливании швеллеров. 2. Деформации под торцом пуансона

Рассматривается определение деформированного состояния заготовки при свободном выдавливании швеллеров. Получены формулы для определения накопленных деформаций в заданной точке очага пластической деформации и выдавленных стенок изделия для любого рабочего хода пуансона.

Ключевые слова: объемная штамповка, выдавливание, несоосное расположение, пуансон, матрица, плоская деформация, накопленные деформации, упрочнение.

Determination of the deformed state of the workpiece at free extrusion of channels is considered. Formulas are obtained for determining the accumulated deformations at a given point of the plastic deformation zone and extruded walls of the product for any punch working stroke.

Keywords: die forging, extrusion, misalignment, punch, matrix, plane strain, accumulated deformations, hardening.

В продолжение работы [1] исследуем деформированное состояние заготовки при выдавливании швеллеров, расчетная схема приведена в статье [1, рис. 1].

Аналогично исследованию закономерностей распределения накопленных деформаций при выдавливании цилиндрических стаканов [2, с. 128] при плоском выдавливании будем полагать, что в зависимости от относительного размера матрицы b_1 [1, рис. 1] и коэффициента трения на поверхности контакта заготовки с торцом пуансона в зоне **2** могут наблюдаться три вида пластического течения: 1) свободное течение (аналог — осадка с сохранением боковой цилиндрической поверхности); 2) течение с застойной зоной, т. е. с полным отсутствием перемещений частиц на поверхности контакта с торцом пуансона (аналог — осадка с застойной зоной, приводящая к образованию бочкообразной формы); 3) затрудненное течение — промежуточный случай (аналог — осадка с образованием небольшой бочкообразности). Для описания трех вариантов течения, принимаем, что осевая скорость течения в зоне **2** определяется более сложной, чем в зоне **1**, квадратичной зависимостью с коэффициентами u и w , удовлетворяющей граничному условию $v_z = 0$ при $z = 0$:

$$v_z = v_0 \left(-u \frac{z}{h_1} + w \frac{z^2}{h_1^2} \right). \quad (46)$$

Из граничного условия $v_z = v_0$ при $z = -h_1$ следует, что коэффициенты u и w связаны уравнением

$$u + w = 1. \quad (47)$$

Из условия несжимаемости [3, формула (12)]

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (48)$$

получим уравнение

$$v_x = - \int \frac{\partial v_z}{\partial z} dx + f(z), \quad (49)$$

где $f(z)$ — произвольная функция от z , возникшая в результате интегрирования частной производной по x .

Подставив выражение (46) в формулу (49), найдем горизонтальную скорость течения:

$$v_x = -v_0 \left(-\frac{u}{h_1} + \frac{2wz}{h_1^2} \right) x + f(z). \quad (50)$$

Из граничного условия $v_x = 0$ при $x = 0$ следует, что произвольная функция $f(z) = 0$, тогда

$$v_x = v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right) x. \quad (51)$$

Конкретизируем коэффициенты u и w в выражении (51) с учетом выражения (47) и упомянутых выше вариантов пластического течения:

1) $u = 1$, $w = 0$ при свободном течении (сохранение цилиндрической поверхности означает, что скорость v_x не должна зависеть от z);

2) $u = 0$, $w = 1$ при течении с застойной зоной (следует из условия $v_x = 0$ при $z = 0$);

3) $u = 0,5$, $w = 0,5$ при затрудненном течении (приняты средние арифметические коэффициенты u и w по первым двум вариантам); при необходимости уточнения можно получить зависимость этих коэффициентов от коэффициента трения на поверхности контакта заготовки с торцом пуансона [4, раздел 12.7].

Подставив в выражение (10) равенство (46), получим:

$$\frac{dz}{dt} = v_0 \left(-u \frac{z}{h_1} + w \frac{z^2}{h_1^2} \right), \quad (52)$$

тогда

$$\int \frac{dz}{-uz + \frac{w}{h_1} z^2} = \frac{v_0}{h_1} \int dt. \quad (53)$$

Проинтегрировав, получим:

$$-\frac{1}{u} \ln C_4 \left(\frac{wz}{wz - uh_1} \right) = \frac{v_0 t}{h_1}. \quad (54)$$

Далее с учетом равенств (14) и (16) получим:

$$-\frac{1}{u} \ln C_4 \left(\frac{wz}{wz - uh_1} \right) = n_1. \quad (55)$$

Потенцируя, получим:

$$C_4 \left(\frac{wz}{wz - uh_1} \right) = e^{-un_1}. \quad (56)$$

Произвольную постоянную C_4 находим из начального условия $z = z_0$ при $n_1 = 0$:

$$C_4 = \frac{wz_0 - uh_1}{wz_0}. \quad (57)$$

Преобразовав выражение (56) с учетом равенства (57), окончательно получим выражение связи с текущей (z) и начальной (z_0) координатами в зоне **2**:

$$z = \frac{uh_1 z_0}{wz_0(1 - e^{-un_1}) + uh_1 e^{-un_1}}. \quad (58)$$

Подставив в выражение (21) равенство (51), получим уравнение

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right) x, \quad (59)$$

которое после подстановки равенства (58) и разделения переменных принимает вид:

$$\frac{dx}{x} = u \left(1 - \frac{2wz_0}{wz_0(1 - e^{-un_1}) + uh_1 e^{-un_1}} \right) \frac{v_0 dt}{h_1}. \quad (60)$$

С учетом равенств (14) и (16) имеем:

$$dn_1 = \frac{ds}{h_1} = \frac{v_0 dt}{h_1}. \quad (61)$$

Подставив равенство (61) в выражение (60), получаем уравнение

$$\frac{dx}{x} = \left(1 - \frac{2wz_0}{wz_0(1 - e^{-un_1}) + uh_1 e^{-un_1}} \right) u dn_1, \quad (62)$$

которое приводим к виду

$$\int \frac{dx}{x} = \int \left[1 - \frac{2}{1 + \left(\frac{uh_1}{wz_0} - 1 \right) e^{-un_1}} \right] d(un_1). \quad (63)$$

Проинтегрировав, получим уравнение

$$\ln C_5 x = 2 \ln \left[1 + \left(\frac{uh_1}{wz_0} - 1 \right) e^{-un_1} \right] - un_1, \quad (64)$$

которое приводим к виду

$$\ln \left\{ \frac{C_5 x}{\left[1 + \left(\frac{uh_1}{wz_0} - 1 \right) e^{-un_1} \right]^2} \right\} = -un_1. \quad (65)$$

Потенцируя последнее выражение, получим:

$$C_5 x = e^{-un_1} \left[1 + \left(\frac{uh_1}{wz_0} - 1 \right) e^{-un_1} \right]^2. \quad (66)$$

Произвольную постоянную C_5 находим из начального условия $x = x_0$ при $n_1 = 0$:

$$C_5 = \frac{1}{x_0} \left(\frac{uh_1}{wz_0} \right)^2. \quad (67)$$

Подставив равенство (67) в выражение (66), окончательно найдем:

$$x = x_0 e^{-un_1} \left[\frac{wz_0}{uh_1} (1 - e^{-un_1}) + e^{-un_1} \right]^2. \quad (68)$$

Аналогично равенствам (29), (30) скорости деформаций с учетом выражений (46) и (51) составят:

$$\xi_z = -v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right); \quad (69)$$

$$\xi_x = v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right). \quad (70)$$

Для упрощения примем, что интенсивность скоростей деформации

$$\xi_i = \beta |\xi_{\max}| = 1,155 \xi_x = 1,155 v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right). \quad (71)$$

Полагая, что в зоне **2** накопленная деформация $e_i = e_i(z)$, перепишем выражение (33):

$$\xi_i = v_z \frac{de_i}{dz}. \quad (72)$$

Подставив в последнее выражение равенства (46) и (71), получим уравнение

$$1,155v_0 \left(\frac{u}{h_1} - \frac{2wz}{h_1^2} \right) = v_0 \left(-u \frac{z}{h_1} + w \frac{z^2}{h_1^2} \right) \frac{de_i}{dz}, \quad (73)$$

которое в интегральном виде

$$\int de_i = -1,155 \int \frac{\left(\frac{2wz}{h_1^2} - \frac{u}{h_1} \right)}{\left(w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1} \right)} dz. \quad (74)$$

Последнее выражение можно записать как

$$\int de_i = -1,155 \int \frac{d \left(w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1} \right)}{\left(w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1} \right)}. \quad (75)$$

Проинтегрировав уравнение (75), получим:

$$e_i = 1,155 \ln \left(\frac{C_6}{w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1}} \right). \quad (76)$$

Произвольную постоянную C_6 находим из начального условия $e_i = 0$ при $z = z_0$:

$$C_6 = w \frac{z_0^2}{h_1^2} - u \frac{z_0}{h_1}. \quad (77)$$

С учетом этого формула (76) принимает окончательный вид:

$$e_i = 1,155 \ln \left(\frac{w \frac{z_0^2}{h_1^2} - u \frac{z_0}{h_1}}{w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1}} \right). \quad (78)$$

Выразим z_0 через z из выражения (58):

$$z_0 = \frac{uh_1 z}{wz(1 - e^{-un_1}) + uh_1 e^{-un_1}}. \quad (79)$$

Подставив полученное выражение в формулу (78), находим накопленную деформацию в зоне **2а**:

$$e_i = 2,31 \ln \left[\frac{uh_1 e^{0,5un_1}}{uh_1 + wz(e^{un_1} - 1)} \right]. \quad (80)$$

Далее с учетом равенства (47) и замены

$$w = 1 - u \quad (81)$$

получим:

$$e_i = 2,31 \ln \left[\frac{uh_1 e^{0,5un_1}}{uh_1 + z(1-u)(e^{un_1} - 1)} \right], \quad (82)$$

Данная формула потребуется для раскрытия неопределенности, возникающей при $u = 0$.

Подставив в формулу (78) $z_0 = -h_1$, с учетом равенства (47) находим накопленную деформацию в зоне **2б**:

$$e_i = -1,155 \ln \left[w \frac{z^2}{h_1^2} - u \frac{z}{h_1} \right]. \quad (83)$$

Подставив $z_0 = -h_1$ в формулу (58), с учетом равенства (47) находим вертикальную координату границы между зонами **2а** и **2б**:

$$z_2 = -\frac{uh_1}{e^{un_1} - w}. \quad (84)$$

Выполним замену (81) в формуле (84), получим формулу

$$z_2 = -\frac{uh_1}{e^{un_1} + u - 1}, \quad (85)$$

которая необходима для раскрытия неопределенности при $u = 0$.

Конкретизируем полученные выражения для разных вариантов пластического течения:

1) при свободном течении ($u = 1, w = 0$) по формулам (84), (80) и (83):

$$z_2 = -h_1 e^{-n_1}, \quad (86)$$

тогда в зоне **2а**:

$$e_i = 1,155 n_1; \quad (87)$$

в зоне **2б**:

$$e_i = 1,155 \ln \left(-\frac{h_1}{z} \right); \quad (88)$$

2) при течении с застойной зоной ($u = 0, w = 1$) по формулам (85), (82) и (83) после раскрытия неопределенности по правилу Лопиталья:

$$\begin{aligned} z_2 &= -\lim_{u \rightarrow 0} \frac{uh_1}{e^{un_1} + u - 1} = -\lim_{u \rightarrow 0} \frac{(uh_1)'}{(e^{un_1} + u - 1)'} = \\ &= -\lim_{u \rightarrow 0} \frac{h_1}{n_1 e^{un_1} + 1} = -\frac{h_1}{n_1 + 1}, \end{aligned} \quad (89)$$

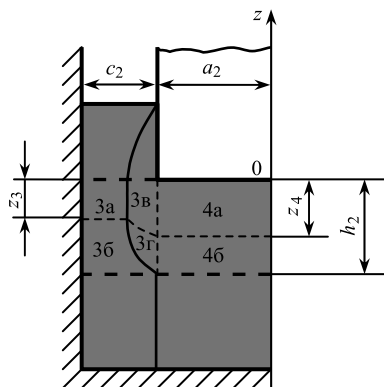


Рис. 4. Характерные зоны деформаций в местах образования тонкой стенки

тогда в зоне **2а**:

$$\begin{aligned}
 e_i &= 2,31 \ln \left\{ \lim_{u \rightarrow 0} \frac{uh_1 e^{0,5un_1}}{uh_1 + z(1-u)(e^{un_1} - 1)} \right\} = \\
 &= 2,31 \ln \left\{ \lim_{u \rightarrow 0} \frac{(uh_1 e^{0,5un_1})'}{[uh_1 + z(1-u)(e^{un_1} - 1)]} \right\} = \\
 &= 2,31 \ln \left\{ \lim_{u \rightarrow 0} \frac{h_1 e^{0,5un_1} + 0,5n_1 u h_1 e^{0,5un_1}}{h_1 + zn_1 e^{un_1} - z(e^{un_1} + un_1 e^{un_1} - 1)} \right\} = \\
 &= -2,31 \ln \left(1 + \frac{zn_1}{h_1} \right); \quad (90)
 \end{aligned}$$

в зоне **2б**:

$$e_i = 2,31 \ln \left(-\frac{h_1}{z} \right); \quad (91)$$

3) при затрудненном течении ($u = 0,5$, $w = 0,5$) по формулам (84), (80) и (83):

$$z_2 = -\frac{h_1}{2e^{0,5n_1} - 1}, \quad (92)$$

тогда в зоне **2а**:

$$e_i = 2,31 \ln \left[\frac{h_1 e^{0,25n_1}}{h_1 + z(e^{0,5n_1} - 1)} \right]; \quad (93)$$

в зоне **2б**:

$$e_i = 1,155 \ln \left[\frac{2h_1^2}{z(z - h_1)} \right]. \quad (94)$$

Эпюры накопленных деформаций для рассмотренных вариантов пластического течения показаны в статье [1, рис. 3]. Эпюры под торцом пуансона

условно показаны прямыми линиями, близкими к криволинейным логарифмическим зависимостям, определяемым полученными формулами накопленных деформаций.

Поскольку зоны **3** и **4** пластической деформации не отличаются от рассмотренных зон **1** и **2**, то для них можно получить аналогичные формулы простой заменой индексов в соответствии с рис. 4 (для возможности размещения обозначений зон внутри областей **3**, **4** они условно показаны с теми же размерами, что и зоны **1**, **2** на рис. 2 в статье [1]): коэффициент обжатия:

$$\psi_2 = \frac{a_2}{c_2}; \quad (95)$$

вспомогательная величина:

$$n_2 = \frac{s}{h_2}; \quad (96)$$

накопленная деформация в зоне **3а**:

$$e_i = 1,155 \psi_2 n_2; \quad (97)$$

координата границы между зонами **3а** и **3б**:

$$z_3 = \frac{h_2}{\psi_2} (e^{\psi_2 n_2} - 1 - \psi_2); \quad (98)$$

рабочий ход, при котором поле деформаций в зоне, примыкающей к стенке матрицы (зона **3б**), станет стационарным:

$$s_{ст} = \frac{h_2}{\psi_2} \ln(1 + \psi_2); \quad (99)$$

накопленные деформации в зоне **3б**:

$$e_i = 1,155 \ln \left(1 + \psi_2 + \psi_2 \frac{z}{h_2} \right); \quad (100)$$

при свободном течении:

$$z_4 = -h_2 e^{-n_2}, \quad (101)$$

тогда в зоне **4а**:

$$e_i = 1,155 n_2; \quad (102)$$

в зоне **4б**:

$$e_i = 1,155 \ln \left(-\frac{h_2}{z} \right); \quad (103)$$

при течении с застойной зоной:

$$z_4 = -\frac{h_2}{n_2 + 1}, \quad (104)$$

тогда в зоне **4а**:

$$e_i = -2,31 \ln \left(1 + \frac{zn_2}{h_2} \right); \quad (105)$$

П. С. СЕРЕНКОВ, д-р техн. наук, Ф. И. РУДНИЦКИЙ, канд. техн. наук, Т. С. ВОРОНОВА (Белорусский национальный технический университет, г. Минск), А. С. ЧАУС, д-р техн. наук (Словацкий технический университет, Словакия, г. Трнава), e-mail: pavelserenkov@bntu.by, e-mail: alexander.chaus@stuba.sk

Экспертные методы разработки инновационных технологий для производства литого инструмента. Часть 1. Формирование комплекса функциональных показателей технологии

Предложен метод разработки эффективной технологии литья заготовок вставных резцов с заданными свойствами из быстрорежущих сталей для фрез роторов горнодобывающих комбайнов, включающей в себя идентификацию комплекса целей, выбор приоритетной технологии и определение заданных характеристик технологии. Предложен альтернативный метод экспертной оценки, обеспечивающий высокую достоверность результатов.

Ключевые слова: инновационная технология, литье, проектирование, метод экспертной оценки.

A method for the development an effective technology for casting of billets of insert cutters with specified properties from high-speed steels for milling cutters of rotors of mining combines is proposed, including the identification of a set of goals, the choice of priority technology and the determination of the specified characteristics of the technology. An alternative method of expert assessment is proposed, which ensures high reliability of the results.

Keywords: innovative technology, casting, design, expert assessment method.

Ключевым этапом жизненного цикла инновационной продукции является этап проектирования и разработки, на котором формируется оптимальный комплекс ее функциональных характеристик. Специфика данного этапа для такой продукции — изначальное отсутствие необходимого количества информации об объекте разработки и невозможность применения метода аналогов и прецедентов, что связано с рисками недостижения оптимальных характеристик исследуемого объекта инноваций, его неготовности к внедрению и практической реализации.

Очевидный способ снижения рисков — проведение в процессе проектирования и разработки множества исследований, в том числе экспериментальных, что делает такой подход достаточно затратным. Значительные расходы временных, финансовых и материально-технических ресурсов снижают ценность результатов исследований. Разработчик вынужден сокращать комплексные исследования и принимать неоптимальные решения ввиду недостаточности информации, что, в свою очередь, повышает риски принятия некорректных решений.



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 53)

в зоне **4б**:

$$e_i = 2,31 \ln \left(-\frac{h_2}{z} \right); \quad (106)$$

при затрудненном течении:

$$z_4 = -\frac{h_2}{2e^{0,5n_2} - 1}, \quad (107)$$

тогда в зоне **4а**:

$$e_i = 2,31 \ln \left[\frac{h_2 e^{0,25n_2}}{h_2 + z(e^{0,5n_2} - 1)} \right]; \quad (108)$$

в зоне **4б**:

$$e_i = 1,155 \ln \left[\frac{2h_2^2}{z(z - h_2)} \right]. \quad (109)$$

Математическое исследование деформированного состояния будет закончено в следующей статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Воронцов А. Л.** Исследование штамповки неравнополочных швеллеров. Ч. 4. Деформированное состояние заготовки при выдавливании швеллеров. 1. Деформации в области образования стенки // Вестник машиностроения. 2021. № 5. С. 44—48.
2. **Воронцов А. Л.** Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Т. 1. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 396 с.
3. **Воронцов А. Л.** Исследование штамповки неравнополочных швеллеров. Ч. 3. Силовые параметры и формоизменение заготовки при выдавливании швеллеров. 1. Кинематическое и напряженное состояния заготовки // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 65—70.
4. **Воронцов А. Л.** Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением. Т. 2. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 441 с.

Подобную проблему пришлось решать на Солигорском калийном комбинате исследовательской группе при разработке проекта технологии литья (ТЛ) из быстрорежущей стали (БС) заготовок режущих вставок резцов ротора горнодобывающего комбайна. Подобные изделия традиционно изготавливаются из заготовок, получаемых металлургическими методами: прокат, порошковое спекание твердых сплавов и др. [1].

При выборе ТЛ для получения заготовок резцов фрез руководство комбината исходило из двух аспектов.

Первый аспект связан с требуемыми эксплуатационными характеристиками резцов. Условия резания рудной породы, режим работы ротора комбайна требуют высокой износостойкости и удовлетворительной ударной прочности инструмента. Этот комплекс характеристик не обеспечивается традиционными способами получения заготовок. В частности, инструменты из проката и твердых сплавов имеют усредненные эксплуатационные показатели как износостойкости, так и ударной вязкости [2]. Технологии литья позволяют более гибко управлять процессом и теоретически обеспечить любое сочетание эксплуатационных свойств резца еще на стадии получения заготовки [3–6].

Второй аспект связан с эффективностью производства режущего инструмента. Импорт порошковых материалов и стоимость оборудования для проката или спекания значительно дороже, чем локализация производства заготовок из БС методами литья. Внедрение инновационной ТЛ заготовок резцов фрез из БС непосредственно на Солигорском калийном комбинате позволит организовать эффективное безотходное производство инструмента [7].

С учетом требований заказчика (Солигорского калийного комбината) разработали стратегию эффективной инновационной ТЛ, обеспечивающей получение заготовок режущих вставок резцов с заданными свойствами из БС. Стратегия включает три последовательных этапа:

- 1) идентификация и формализация целей — функциональных показателей разрабатываемой ТЛ;
- 2) выбор приоритетной ТЛ;
- 3) определение рациональных значений характеристик приоритетной ТЛ из БС заготовок с заданными свойствами.

Инновационный характер проекта предполагает, что для его успешной реализации ключевое значение имеют этапы 1 и 2. Наиболее эффективный способ организации исследований на этих этапах — методы экспертной оценки [8–10]. Именно их применение позволит снизить расходы временных, финансовых и материально-технических ресурсов.

Существующие методы экспертной оценки в качестве альтернативы экспериментальным ресурсоемким исследованиям предлагают специфический инструмент — опрос экспертов [11, 12]. Источни-

ком информации в этом случае служит суждение специалиста, имеющее субъективный характер и, соответственно, небольшие достоверность и надежность [13, 14]. Это неизбежно повышает риски в отношении достоверности результатов исследований и, следовательно, риски недостижения конечных целей исследования — оптимальных характеристик разрабатываемой технологии или материала.

Традиционно с методами экспертной оценки связывают научное направление — квалиметрию [8], в которой характерным способом повышения объективности оценки является согласованное мнение группы экспертов. Но даже при правильной организации групповой опрос экспертов имеет ряд недостатков [14, 15].

На основании комплексного исследования экспертной оценки установлено, что существующие методы нацелены на повышение достоверности получаемой информации главным образом за счет снижения групповой вариации мнений экспертов (групповой несогласованности) [14]. Нами установлен неявный источник снижения достоверности экспертных оценок — индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта, которая рассматривается как их вариация в отношении одного и того же объекта оценки. Индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта вносит в снижение достоверности экспертной информации вклад, соизмеримый с вариацией мнений группы экспертов.

С учетом этого нами разработан комплекс методов экспертной оценки, отличающихся особым подходом к сбору, анализу и оценке эвристических суждений экспертов. Комплекс включает три базовых метода: альтернатив как метод экспертной оценки единичным экспертом объектов инноваций по одному показателю результативности [14]; альтернатив как метод экспертной оценки группой экспертов объектов инноваций по одному показателю результативности [14]; "покоординатного спуска" как метод экспертной оценки объектов инноваций одновременно по нескольким показателям результативности [16]. Эффективное применение базовых методов экспертной оценки для реализации этапов 1 и 2 проекта эффективной разработки инновационной ТЛ рассмотрим далее.

Реализация этапа 1 включает два шага: 1) определение полного множества целей; 2) ранжирование полного множества целей на основе экспертных оценок предпочтительности и формирование комплекса целей как критериев разработки инновационной ТЛ.

Для шага 1 — определения полного множества целей, мировой опыт управления качеством предлагает большой набор специальных технологий: мозговой штурм; метод Дельфи; методы 4М (Material—Man—Machine—Method) и 5М (Material—Man—Machine—Method—Medium); функциональное мо-

делирование процессов IDEF0 и др. [14, 17, 18]. Очевидно, что результативность действий исследовательской группы на этом шаге зависит, прежде всего, от квалификации и опыта экспертов. Это наиболее "слабое звено" предлагаемой нами стратегии в силу абсолютно субъективного характера экспертных оценок (мнений).

Для шага 2 — ранжирования полного множества целей, предлагается следующее. Если идентифицирована единственная цель, то, очевидно, необходимо перейти к реализации этапа 2 — выбор приоритетной ТЛ. Если идентифицированы две цели, задача оценки приоритетности решается простым сравнением и принятием решения на основании согласованности мнений экспертов в группе. Если идентифицированы три и более целей, то для принятия решения о необходимом и достаточном комплексе показателей качества реализуется процедура ранжирования и оценки их приоритетности. Учитывая высокие риски некорректного решения данной задачи, для ее решения нами предложен метод альтернатив [14, 16].

К особенностям оценки некоторого показателя (в нашем случае — приоритетности цели) методом альтернатив можно отнести: получение информации от эксперта в вербальном виде с использованием шкалы сравнительных предпочтений (шкалы оценок Т. Саати [10]); альтернативные оценки показателя одним и тем же экспертом; проверку совпадения альтернативных оценок эксперта как степени его индивидуальной несогласованности.

Алгоритм реализации метода альтернатив одним экспертом включает следующую последовательность действий.

1. Эксперт предварительно ранжирует цели по степени предпочтительности.

2. Эксперт вербально по шкале Т. Саати попарно оценивает степень предпочтительности целей в соответствии с двумя планами сбора экспертной информации (планы *A* и *B*, рис. 1): план *A* — каждая цель из ранжированного ряда сравнивается с предыдущей; план *B* — каждая цель из ранжированного ряда сравнивается с первой.

3. Эксперт оцифровывает свои данные, переводя вербальные оценки в числовые сравнительные оценки по шкале Т. Саати.

4. Для двух массивов числовых сравнительных оценок, полученных из планов *A* и *B*, эксперт составляет две системы линейных уравнений, решение которых позволяет получить альтернативные значения абсолютных оценок предпочтительности целей соответственно для планов *A* и *B* [14].

5. Руководитель группы проверяет индивидуальную несогласованность оценок эксперта по критерию K_1 доверия как степень совпадения альтернативных абсолютных оценок предпочтительности целей, полученных в соответствии с планами *A* и *B* [14, 16].

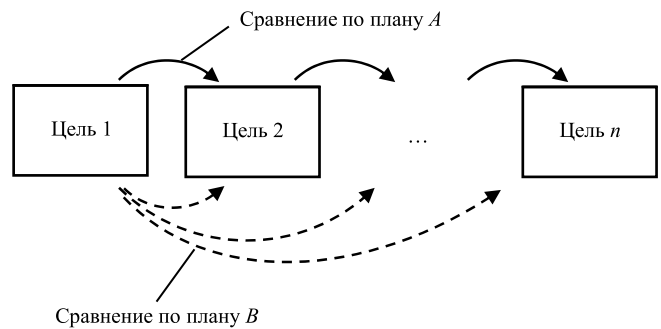


Рис. 1. Схема опроса экспертов для оценки предпочтительности целей методом альтернатив:

A и *B* — планы оценки эксперта по результатам попарного сравнения альтернатив-целей соответственно "каждой с предыдущей" и "каждой с первой"

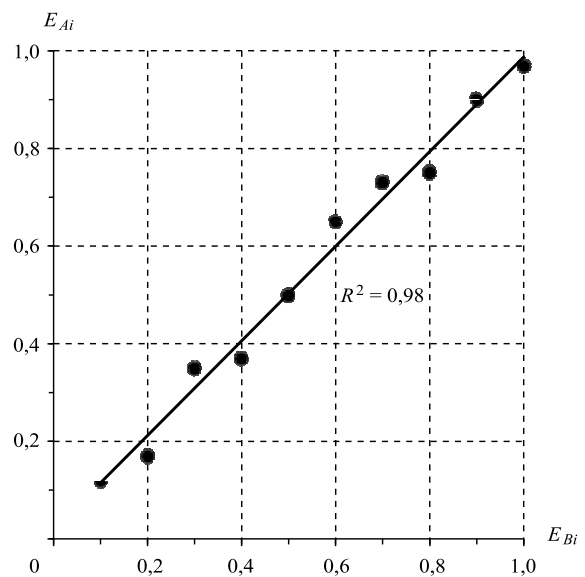


Рис. 2. Графическая интерпретация проверки индивидуальной несогласованности оценок эксперта по критерию доверия K_1

По критерию K_1 оценки показателя качества устойчивы, если альтернативные абсолютные оценки предпочтительности целей E_A (план *A*) и E_B (план *B*) из ранжированного ряда целей связаны статистически значимой адекватной возрастающей линейной зависимостью (рис. 2).

Количественно оценить степень индивидуальной несогласованности оценок эксперта, полученных из разных планов опроса, можно с использованием регрессионного анализа. Количественной характеристикой может быть коэффициент детерминации R^2 . Чем ближе R^2 к 1, тем меньше индивидуальная несогласованность эксперта и, как следствие, ниже достоверность оценок в отношении объекта оценки. Если R^2 недопустимо меньше 1, можно считать, что эксперт неуверенно (наугад) оценил предпочтительности идентифицированных целей. Руководитель проекта инициирует повторный опрос эксперта. Опросы продолжаются до тех пор, пока индивидуальная несогласованность экс-

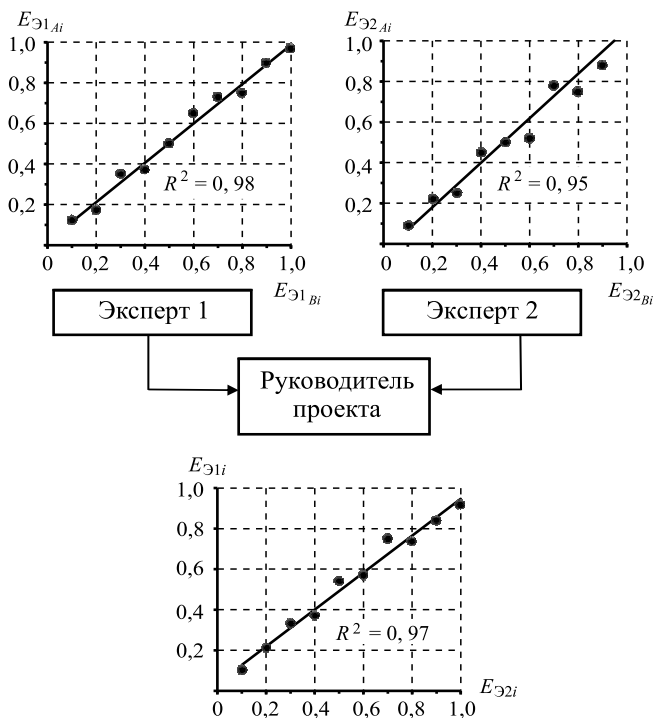


Рис. 3. Схема опроса и графическая интерпретация проверки групповой несогласованности оценок экспертов по критерию доверия K_2

перта не придет в соответствие с требованиями руководителя проекта. В качестве абсолютных оценок предпочтительности целей одним экспертом из ряда можно принять среднее $E_{\Delta i} = 0,5(E_{iA} + E_{iB})$, где i — номер цели в ряду.

Как правило, в подобного рода проектах с высоким риском недостижения целей участвует группа экспертов. Несогласованность их мнений также может служить индикатором недостоверности оценок предпочтительности целей. Для проверки согласованности мнений группы экспертов предлагается метод альтернатив, представленный на рис. 3. В оценке участвуют, например, два эксперта-исследователя и руководитель проекта. Каждый эксперт ($\Delta 1$ и $\Delta 2$) реализует планы оценки A и B ме-

тодом альтернатив, как было указано выше, и представляет руководителю проекта абсолютные оценки предпочтительности ранжированного ряда целей $E_{\Delta 1i}$ и $E_{\Delta 2i}$, где i — число оцениваемых целей.

Руководитель проекта проверяет согласованность мнений экспертов, применяя критерий доверия K_1 (коэффициенты детерминации R^2_1 и R^2_2) к оценкам $E_{\Delta 1i}$ и $E_{\Delta 2i}$. По аналогии определяется групповая согласованность мнений экспертов с помощью коэффициента детерминации R^2 (см. рис. 3). Чем ближе R^2 к 1, тем меньше групповая несогласованность мнений экспертов и, как следствие, ниже достоверность окончательных оценок E_i . Если R^2 недопустимо меньше 1, можно считать, что мнения экспертов существенно различаются в отношении предпочтительности идентифицированных целей. Действия руководителя проекта в этом случае аналогичны рассмотренной выше ситуации с одним экспертом [14]. В качестве окончательных оценок E_i значений предпочтительности целей из ряда можно принять среднее $E_i = 0,5(E_{\Delta 1i} + E_{\Delta 2i})$, где i — номер цели в ряду.

После того как полное множество идентифицированных целей ранжировано и оценено по шкале интервалов, возможны несколько вариантов принятия решения: оставить весь ранжированный и оцененный по предпочтительности комплекс целей; минимизировать комплекс целей по методу Парето (ABC -анализ) [8, 14, 17]; оставить только самую предпочтительную цель.

Рассмотрим реализацию этапа 1.

На первом шаге реализации проекта разработки ТЛ заготовок из БС резцов ротора горнодобывающего комбайна методом мозгового штурма выбрали технологию литья из быстрорежущей стали типа Р6М5 или Р18, которая отвечала бы множеству функциональных показателей (целей): технологичность (Π_1); производительность (Π_2); экономичность (Π_3); экологичность (Π_4); требуемые структура и физико-механические свойства заготовки (Π_5) и геометрические параметры в поперечном ($\varnothing 9$ мм)

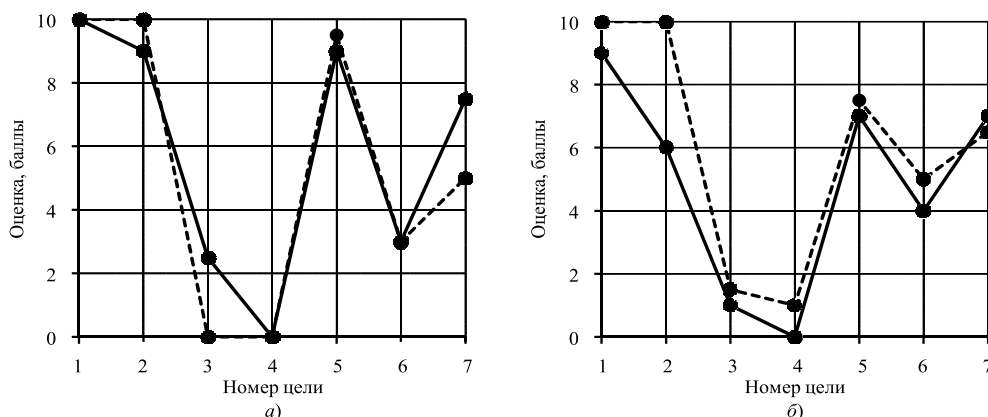


Рис. 4. Ранжирование целей первым (а) и вторым (б) экспертами по планам A (—) и B (-----)

Окончательные оценки E_i предпочтительности целей разработки инновационной ТЛ заготовок из БС резов ротора

Ранжированные цели	Ц ₁	Ц ₂	Ц ₅	Ц ₇	Ц ₆	Ц ₃	Ц ₄
Оценка предпочтительности цели (диапазон — от 0 до 10)	10,000	8,825	8,225	7,150	3,525	2,025	0

и продольном ($l = 160$ мм) сечениях (Ц₆); гарантированная отливка (без "непроливов") длинных заготовок (Ц₇). Два эксперта исследовательской группы методом альтернатив оценили предпочтительность множества целей Ц₁ — Ц₇. Альтернативные оценки, полученные каждым экспертом по мере реализации планов опроса А и В, приведены на рис. 4.

Руководитель проекта проверил внутреннюю согласованность мнений каждого эксперта по критерию K_1 . Числовые значения коэффициентов детерминации альтернативных оценок ($R_1^2 = 0,96$ — для первого эксперта, $R_2^2 = 0,93$ — для второго эксперта) показали высокую внутреннюю согласованность мнений каждого эксперта.

Последующая проверка групповой согласованности мнений экспертов по критерию K_1 также показала высокую согласованность мнений группы экспертов (коэффициент детерминации оценок обоих экспертов $R^2 = 0,96$) и, соответственно, высокую достоверность оценок предпочтительности целей. Окончательные оценки E_i значений предпочтительности целей приведены в таблице.

На втором шаге руководитель проекта по результатам анализа полученных оценок предпочтительности (см. таблицу) принял решение минимизировать комплекс целей по методу Парето. Используя ABC-анализ, руководитель проекта принял обоснованное решение о разработке ТЛ из БС, обеспечивающей достижение трех наиболее приоритетных целей: Ц₁ — технологичность, Ц₂ — производительность, Ц₅ — требуемые структура и физико-механические свойства заготовки.

Выводы

Установлено, что на этапе проектирования и разработки инновационной продукции в силу изначального отсутствия достаточной информации об объекте разработки возникает необходимость проведения большого объема исследований по определению оптимальных характеристик исследуемого объекта. С целью повышения эффективности экспериментальных исследований предложена стратегия, в которой ключевыми являются методы экспертных оценок. Стратегия опробована при разработке инновационной технологии литья, обеспечивающей получение заготовок режущих вставок из быстрорежущей стали с заданными свойствами для

фрезы ротора горнодобывающего комбайна в условиях Солигорского калийного комбината. Эффективность стратегии проектирования определяет комплекс оригинальных методов экспертных оценок, отличающихся особым подходом к сбору, анализу и оценке эвристических суждений экспертов и обеспечивающих высокую достоверность получаемых результатов оценивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гелин Ф. Д., Чаус А. С. Металлические материалы. Минск: Высшая школа, 2007. 396 с.
2. Рудницкий Ф. И. Особенности эксплуатации инструмента из литой быстрорежущей стали // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч. 2. С. 173—177.
3. Chaus A. S., Rudnitskii F. I. Effect of modification on the structure and properties of cast tungsten-molybdenum high-speed steels // Metal Science and Heat Treatment. 1989. V. 31. P. 121—128.
4. Chaus A. S., Hudáková M. Wear resistance of high-speed steels and cutting performance of tool related to structural factors // Wear. 2009. V. 267. P. 1051—1055.
5. Chaus A. S. Microstructural and properties evaluation of M2 high speed steel after inoculating addition of powder W and WC // Materials Science and Technology. 2014. V. 30. P. 1105—1115.
6. Microstructure and properties of M2 high-speed steel cast by the gravity and vacuum investment casting / A. S. Chaus, M. Bračik, M. Sahul, M. Dománková // Vacuum. 2019. V. 162. P. 183—198.
7. Чаус А. С., Рудницкий Ф. И. Влияние условий эксплуатации литого металлорежущего инструмента на особенности его изнашивания и стойкость. Часть 1. Анализ условий работы инструментов // Трение и износ. 2007. Т. 28. № 5. С. 449—456.
8. Азгальдов Г. Г. Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. М.: Экономика, 1982. 256 с.
9. Орлов А. И. Эконометрика. М.: Изд-во "Экзамен", 2002. 576 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Изд-во "Радио и связь", 1993. 278 с.
11. Сатаров Г. А., Каменский В. С. Общий подход к анализу экспертных оценок методами неметрического многомерного шкалирования // Статистические методы анализа экспертных оценок. М.: Наука, 1977. 107 с.
12. Кнорринг В. Г. Развитие репрезентационной теории измерений // Измерения. Контроль. Автоматизация. 1980. № 11—12. С. 3—9.
13. Хамханова Д. Н. Теоретические основы обеспечения единства экспертных измерений. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. 170 с.
14. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации / П. С. Серенков, В. Л. Гуревич, В. М. Романчук, А. В. Янушкевич. Минск: Новое знание, 2012. 243 с.
15. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8—13.
16. Серенков П. С., Хорлоогийн А. С. Системный подход к качеству физкультурно-оздоровительных услуг // Стандарты и качество. 2017. № 10 (964). С. 98—101.
17. Окрепилов В. В. Менеджмент качества. СПб.: Наука, 2003. 992 с.
18. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач; 3-е изд. Петрозаводск: Изд-во "Скандинавия", 2003. 240 с.

Е. Н. КАБЛОВ, акад. РАН, В. В. АНТИПОВ, канд. техн. наук,
Н. Ю. СЕРЕБРЕННИКОВА, канд. техн. наук, В. В. СИДЕЛЬНИКОВ,
Ю. Н. НЕФЕДОВА (ВИАМ, г. Москва), П. С. ОГУРЦОВ, В. А. СОЛОВЬЕВ
(ПАО "ВАСО"), e-mail: org80@viam.ru

Технологические особенности автоклавного формования деталей сложной конфигурации из листов сплава В950ч¹

Показана разработка с применением моделирования технологического процесса автоклавного формования, совмещенного с процессом старения, для изготовления верхних обшивок крыла из листов высокопрочного сплава В950ч с учетом пружинения заготовки. Приведены результаты исследований показателей механических и коррозионных свойств получаемого изделия.

Ключевые слова: автоклавное формование, термическая обработка, пружинение, верхняя обшивка крыла, листовый материал, сплав В950ч.

The development is shown with the use of modeling the technological process of autoclave molding, combined with the aging process, for the manufacture of upper wing skins from sheets of "В950ч" high-strength alloy taking into account the spring back of the workpiece. The results of studies of indicators of mechanical and corrosion properties of the resulting product are presented.

Keywords: autoclave molding, heat treatment, springback, upper wing skin, sheet material, "В950ч" alloy.

В настоящее время наиболее эффективным способом изготовления деталей из высокопрочных сплавов В950ч, В95пч (зарубежные аналоги 7475, 7175) и особопрочных сплавов типа В96ц-3пч (зарубежные аналоги 7449, 7055) является автоклавное формование в специальной технологической оснастке со ступенчатым искусственным старением. Данный способ плавной деформации при повышенной температуре позволяет за одну операцию получить деталь заданной сложной формы,

что обеспечивает минимальную последующую механическую обработку.

Фирма Airbus успешно применяет данную технологию (операции age forming, creep forming, creep-age forming) при изготовлении верхних крыльевых панелей с цельнометаллическими обшивками из плит алюминиевых сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu: для самолетов А-320, А-330, А-340 используют сплав 7475 (отечественный аналог В950ч) с термической обработкой Т73 (в России режим Т3); для самолета супергиганта А-380 используют сплавы 7449, 7055 (аналог В96ц-3пч) с термической обработкой Т79 (в России режим Т22) [1—7].

В автоклавах фирмы Airform, обеспечивающих высокие точность ($\pm 1^\circ\text{C}$) и однородность распределения температуры, подвергают формоизменению круп-

ногабаритные панели крыла двойной кривизны длиной до 33 м и шириной до 2,8 м [5].

Важнейшими задачами при реализации автоклавного процесса являются разработка и оптимизация параметров режима обработки, обеспечивающих требуемые свойства получаемого узла.

Исследованиями металлургов [8] и структурными исследованиями при разработке процесса автоклавного формования [1, 6, 8—10] установлено, что деформация ускоряет и изменяет характер распада твердого раствора по упрочняющим фазам, что вызывает необходимость корректировки режима старения для сохранения комплекса свойств получаемой детали.

Автоклавное формование обеспечивает высокую точность деталей сложной формы, а также однородность структуры и требуемые свойства материала в изделии. Кроме того, можно получить деталь за одну операцию и исключить ручную правку, что уменьшает трудоемкость и объем подгоночных и сборочных работ.

В России ведутся исследования по оптимизации технологических процессов изготовления деталей из алюминиевых сплавов с целью снижения трудозатрат, сокращения цикла операции, повышения однородности свойств во всем объеме готовой детали [11—16].

Цель настоящей работы — исследование структуры, механических и коррозионных показателей фрагментов верхних обшивок панелей крыла, получаемых из листов сплава В950чТ2 автоклавным способом при разных режимах формования.

Исследовали конструктивно-подобные образцы из фрагментов верхних обшивок крыла размерами 1500 × 2000 мм, получаемые из листов сплава В950ч толщиной 6 мм на ПАО "ВАСО" с использованием автоклава фирмы Scholz,

¹ Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.1 "Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения" (Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.).

внутренние размеры которого составляют $3000 \times 16\,000$ мм. Данный автоклав обеспечивает регулирование давления и температуры для равномерного нагрева заготовки по всей площади, отклонения температурного поля не превышают ± 3 °С, отклонения давления от номинального значения не более $\pm 1,5$ %.

В ФГУП "ВИАМ" с учетом имеющегося опыта по разработке режимов термической обработки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu [17—24] осуществляли предварительную термическую обработку листов и последующее автоклавное формование, совмещенное с процессом старения до состояния термической обработки T2. Затем по всей площади обшивки методом вихревых токов (ОСТ 190291—79) определяли удельную электрическую проводимость с помощью системы TER-200RH с целью контроля качества термической обработки.

Структуру образцов, вырезанных из фрагментов обшивок, исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ММ 1.595-17-351).

Испытания на расслаивающую коррозию (ГОСТ 9.904—82) осуществляли с полным погружением в раствор № 4 образцов с размерами 40×60 мм, вырезанных в продольном направлении, с выдержкой в течение 7 суток.

Механические испытания на растяжение при нормальной температуре (ГОСТ 1497—84) образцов из сплава В950чТ2 с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ выполняли на испытательной машине Zwick Roell Z100 ТЕМ. Показатели механических свойств при растяжении полученных фрагментов обшивок исследовали на образцах, вырезанных из центральных и периферийных зон в поперечном направлении.

Для трехмерного моделирования фрагментов крыла использовали программу Siemens Unigra-

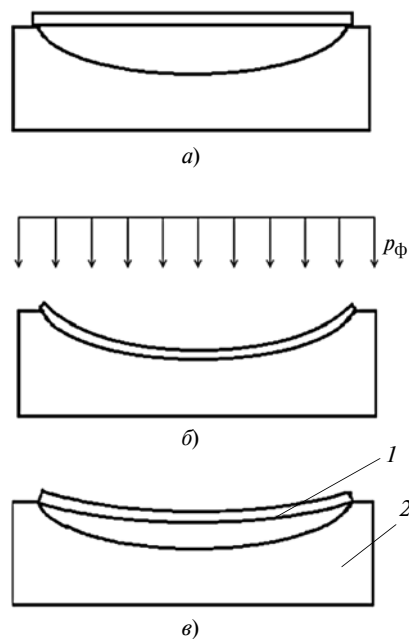


Рис. 1. Листовая заготовка перед формованием (а), в процессе формования (б) и после снятия давления и охлаждения (в):

1 — листовая заготовка; 2 — технологическая матрица

phics NX с расчетным модулем NX Nastran.

Раскрой листов осуществляли с помощью установки Omada LC-2415αIII NT для лазерной резки, заготовки толщиной от 3,5÷5,5 мм получали фрезерованием с помощью трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ Protek Concept 4020 CU 16R 1T.

Контроль размеров рабочего контура отформованных фрагментов обшивки панели крыла проводили на соответствие геометрическим параметрам контура электронной модели с помощью лазерного трекера Absolute Tracker AT 960 фирмы LEICA, оснащенного беспроводным шупом T-Probe.

Поверхности фрагментов обшивок, помещенных в технологическую матрицу, сканировали с шагом 50 мм в пяти контрольных сечениях. Предварительно задавали три базовые точки — крайние угловые точки на фрагментах. Данные сканирования сопоставляли с контуром модели в программе SPATIAL ANALYSER.

По сравнению с методами, основанными на анализе экспериментальных данных, компьютерное моделирование позволяет значительно сократить время разработки новой технологии. При разработке режимов формования изменяли основные параметры процесса: давление p_f , температуру T_f , время t_f выдержки. Были получены 3D-модели детали с учетом ее пружинения.

Изменение формы листовой заготовки в процессе автоклавного формообразования приведено на рис. 1.

Последовательность обработки автоклавного формования:

- 1) разработка компьютерной модели детали;
- 2) компьютерное моделирование процесса формования детали из плоской заготовки;
- 3) разработка модели технологической матрицы на основании электронной модели детали с учетом пружинения заготовки;
- 4) изготовление технологической матрицы;
- 5) предварительная термическая обработка листов с учетом воздействия температуры и деформаций при автоклавном формовании по разработанным режимам;
- 6) фрезерование требуемой толщины заготовок из полуфабриката;
- 7) закрепление плоской заготовки на технологической матрице и формирование вакуума между заготовкой и формообразующей поверхностью оснастки;
- 8) автоклавное формование, совмещенное с термической обработкой при заданных p_f , T_f , t_f ;
- 9) контроль показателей механических свойств на образцах-свидетелях и геометрических параметров детали для оценки отклонений от электронной модели;
- 10) корректировка расчетов с учетом пружинения (при необходимости), доработка рабочего контура технологической матрицы и режима формования.

Моделирование процесса формования фрагментов крыла из листового материала с использованием конечно-элементного метода для расчета кривизны рабочей поверхности технологических матриц и дальнейшей оптимизации технологического процесса осуществляли в несколько этапов.

Сначала в программе Unigraphics NX полученные модели разбили на конечные элементы в виде тетраэдров, т. е. сформировали конечно-элементные сетки для заготовки (рис. 2, см. обложку) и модели фрагмента верхней обшивки крыла (рис. 3, см. обложку).

Затем, используя модуль NX Nastran для решения динамических линейных и нелинейных задач, смоделировали напряженно-деформированное состояние заготовки при формовании.

Далее сформировали контактную поверхность матрицы с учетом заданной конфигурации конечного изделия.

На следующем этапе моделировали воздействие нагрузки при автоклавном формовании на предварительно выбранных режимах, используя показатели уп-

ругости, пластичности и ползучести материала [25, 26].

Усилие деформации, определяемое давлением в автоклаве, оценивали по пределам длительной прочности и ползучести сплава В950ч в зависимости от температуры (табл. 1).

Для определения температуры в автоклаве использовали показатели пластических свойств материала (табл. 2). Было установлено, что температура формования должна составлять $T_{\text{ф}} = 155 \div 165$ °С.

Время воздействия давлением определяли по граничным условиям: деформация заготовки за 10 ч не должна превышать 2 %.

Таким образом, были определены параметры режима формования: $\rho_{\text{ф}}$, $T_{\text{ф}}$, $t_{\text{ф}}$.

Моделированием устанавливали распределение напряжений (рис. 4, см. обложку) и эквивалентных деформаций ползучести (ЭДП), определяющих напряжения растяжения в свободно-лежащей незакрепленной заготовке, при формовании (рис. 5, см. обложку).

После снятия нагрузки наблюдалось пружинение обрабо-

танного образца (рис. 6, см. обложку).

При изготовлении деталей формованием главной задачей является минимизация отклонений формы конечного изделия от исходной математической модели. С помощью расчетного модуля NX Nastran были смоделированы поля напряжений после максимальной деформации заготовки (рис. 7, см. обложку), а также поля деформаций после снятия нагрузки (рис. 8, см. обложку).

Затем выполняли корректировку поверхности исходной модели матрицы с целью минимизации отклонений. Допустимые отклонения устанавливали исходя из допусков на размеры и формы верхней обшивки крыла летательного аппарата. Добившись требуемой точности, по полученной 3D-модели изготовили матрицу.

Перед автоклавным формованием выполняли предварительную термическую обработку листов из сплава В950ч на оборудовании ОАО "КУМЗ".

Затем плоскую отфрезерованную листовую заготовку переменной толщины размещали на матрице. Формование фрагментов верхней обшивки крыла осуществляли с помощью оснастки с плавным приложением нагрузки на заготовку при температуре второго этапа двухступенчатого режима старения Т2. Для снижения термических напряжений и пластических упругих остаточных деформаций заготовку охлаждали медленно.

Далее оценивали точность геометрии отформованных фрагментов измерениями и сопоставлением с электронной моделью.

Пружинение отформованного фрагмента определяли экспериментально по отклонению рабочего контура детали от контура матрицы.

Размеры полученных формованием фрагментов крыла соответствовали контуру электрон-

Таблица 1

Показатели прочностных свойств образцов из сплава В950ч в состоянии Т2 при разных температурах, МПа

$T, ^\circ\text{C}$	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$
100	—	380	335	325	275
125	—	320÷350	—	285	—
150	305	215÷235	130	185	110
200	170	100	65	70	40

Таблица 2

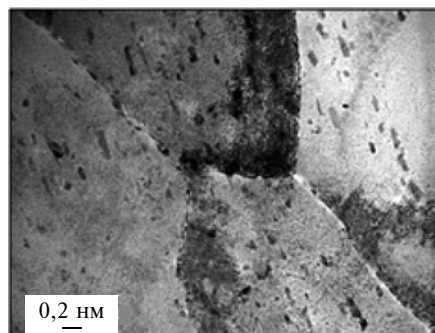
Показатели упругих свойств листа толщиной 6 мм из сплава В950чТ2 при разных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$E_{\text{сж}}, \text{ГПа}$	$G, \text{ГПа}$	μ
20	68	70	27	0,35
100	63	64,5	24,5	0,33
125	61	—	—	—
150	58	59,5	22,5	0,38
175	54	—	—	—
200	52	53,5	0,38	0,39

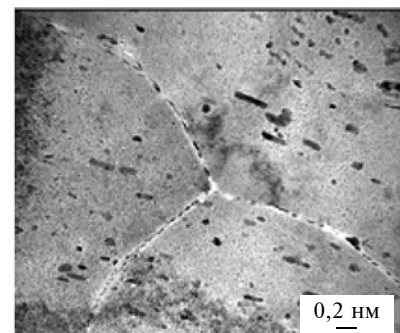
ной модели. Экспериментальное пружинение составило 47,5 % с близкой схожимостью к расчетному пружинению (45,4 %).

Коррозионная стойкость материала заготовки зависит от распада твердого раствора, степень которого можно определить по удельной электрической проводимости, т. е. коррозионную стойкость материала можно оценить без испытаний. Известно, что для листовых полуфабрикатов из сплава В95очТ2 удельная электрическая проводимость более 21,0 МСм/м указывает на высокую стойкость к расслаивающей коррозии. По всей поверхности фрагментов верхних обшивок крыла измерили удельную электрическую проводимость (рис. 9), диапазон значений составил $\gamma = 21,1 \div 21,4$ МСм/м, что удовлетворяет требованию ОСТ 1 90125—83 ($\gamma > 21,0$ МСм/м). Показатель расслаивающей коррозии для исследуемых образцов составлял 2—3 балла, что соответствует требуемым значениям для сплава В95оч после термической обработки Т2 (табл. 3).

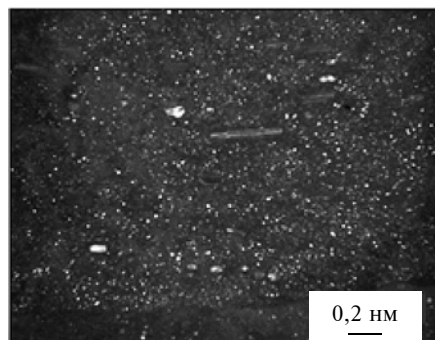
Показатели механических свойств при растяжении и нормальной температуре для образцов из листов толщиной 6 мм, вырезанных из центральных и периферийных зон в поперечном направлении (см. рис. 9),



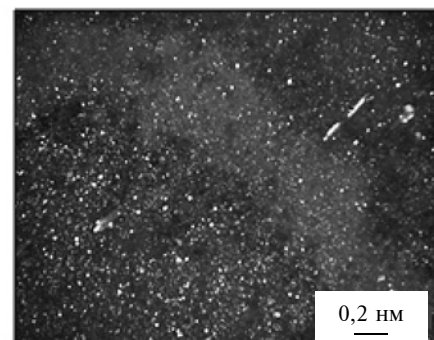
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Микроструктуры образцов из фрагментов верхней обшивки крыла после формования:

а, б — субзеренная структура; в, г — η-фаза

имели незначительный разброс: временное сопротивление $\sigma_B = 520 \div 540$ МПа; предел текучести $\sigma_{0,2} = 450 \div 465$ МПа; относительное удлинение $\delta = 10 \div 12$ %.

Исследования образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что после формования при $T = T_{\Phi} = 155 \div 165$ °С и выбранном времени выдержки $t = t_{\Phi}$ с де-

формацией до 1,5 % они имеют частично рекристаллизованную структуру (рис. 10, а, б).

Основной упрочняющей фазой для сплава В95оч является когерентная матрица упрочняющая η-фаза ($MgZn_2$), представленная несколькими метастабильными модификациями, которые различаются размерами и морфологией, η-фаза распределена с высокой плотностью в объеме зерен и субзерен и имеет размер $14 \div 16$ нм (см. рис. 10, в, г), в структуре в объеме зерен и субзерен обнаружены наночастицы η-фазы размером до 14 нм высокой плотности. Вдоль субграниц присутствуют свободные от выделений зоны шириной $18 \div 20$ нм. В структуре образцов наблюдаются дисперсоиды разных форм, их размеры варьируются от 30 до 80 нм.

Таким образом, исследования показали, что метод автоклавного формования позволяет изготавливать детали сложной конфигурации за один технологичес-

Таблица 3

Показатели механических свойств образцов при растяжении (поперечное направление), расслаивающей коррозии и удельной электрической проводимости фрагментов верхних обшивок крыла из листов сплава В95очТ2

Места вырезки (см. рис. 9)	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	γ , МСм/м	РСК, балл
1—3	$\frac{520 \div 540^*}{530}$	$\frac{455 \div 465}{460}$	$\frac{10,5 \div 11,5}{11,0}$	$\frac{21,1 \div 21,3}{21,2}$	2, 3
4—6	$\frac{525 \div 535}{540}$	$\frac{455 \div 465}{460}$	$\frac{10,0 \div 11,0}{10,5}$	$\frac{21,1 \div 21,2}{21,1}$	2, 3
7—9	$\frac{525 \div 540}{535}$	$\frac{450 \div 460}{455}$	$\frac{10,5 \div 12,0}{11,0}$	$\frac{21,1 \div 21,4}{21,2}$	2, 3

Примечание. В знаменателе приведен диапазон значений, в числителе — среднее значение.

кий процесс, например, обшивки крыла с двойной кривизной из листов сплава В950с с термической обработкой до состояния Т2. При этом обеспечиваются однородная структура, высокая прочность и требуемая коррозионная стойкость, время изготовления деталей сокращается на 30÷35 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Pitcher P. D., Styles C. M.** Greep forming of 2024A, 8090 and 7449 Alloys Defence Evaluation and Research // Conf. ICAA-7. USA. Agency DERA. Farnborough: UK. 2000. P. 1. P. 455—460.

2. **Airbus Industrie Material Specification, Aluminium Alloy 7449-T7951, Plate.** AIMS-03-02-016. 1998.

3. **Airbus Industrie Material Specification, Aluminium Alloy 7449-T7951, Extruded section.** AIMS-03-05-015. 1998.

4. **Age Forming Technology for Aircraft Wing Skin / T. Adachi, S. Kimura, T. Nagayama an. ol. Japan: Aerospace Company, Proc. of ICAA-9. Australia.** 2004. P. 202—207.

5. **Robey R. F., Prangnell P. B., Dif R.** A Comparison of the Stress Relaxation Behavior of Three Aluminium Aerospace Alloys for Use in Age Forming Applications. UK: Manchester Materials Science Centre; France: Pechiney Rhenalu, Proc. of ICAA-9. Australia. 2004. P. 132—138.

6. **Bakavos D., Prangnell P. B., Dif R.** A Comparison of the Effects of Ageforming on the Precipitation Behaviour in 2XXX, 6XXX and 7XXX Aerospace Alloys. UK: Manchester Materials Science Centre; France: Pechiney Rhenalu, Proc. of ICAA-9. Australia. 2004. P. 124—131.

7. **Microstructural Interactions During Stress Ageing a 7475 Aerospace Alloy / Manchester D. Bakavos, P. B. Prangnell, B. Bes an. ol. UK: Materials Science Centre; France: Alcan Centre de Recherches de Voreppe, Proc. of ICAA-10. Canada.** 2006. P. 333—338.

8. **Металловедение алюминия и его сплавов: Справочник / Под ред. И. Н. Фридляндера.** М.: Металлургия, 1983. 279 с.

9. **Исследования** процесса автоклавного формообразования крыль-

вых панелей самолетов из высокопрочных алюминиевых сплавов в состоянии ползучести / П. С. Огурцов, В. А. Соловьев, О. Г. Сенаторова и др. // Сб. док. междунар. науч.-техн. конф. "Развитие фундаментальных основ материаловедения легких сплавов и композиционных материалов на их основе для создания изделий аэрокосмической и атомной техники". М.: ВИАМ, 2013. С. 21.

10. **Моснюк В. Н., Ворвуль С. В., Томчани О. В.** Дифференциальное вакуумное формование как усовершенствованная технология вакуумного формования // *Авиационные материалы и технологии.* 2017. № 4. С. 37—41. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-37-41.

11. **Исследование** пружинения листовых материалов при операциях обтяжки / С. Т. Баскаков, С. С. Одинг, В. И. Максименков, Н. А. Майника // *Тр. НИАТ.* 1978. № 379. С. 1—15.

12. **Горев Б. В., Веричев С. Н., Равевская Г. А.** К анализу формообразования оребренных панелей при медленных режимах деформирования // *Авиационная промышленность.* 1990. № 2. С. 8—10.

13. **Братухин А. Г.** Современные технологии авиастроения / Под ред. А. Г. Братухина, Ю. Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

14. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

15. **Шевнюк Ю. В., Верина Т. А.** Теоретические и экспериментальные исследования горячей штамповки листовых деталей // *Тр. НИАТ.* 1975. № 365. С. 1—20.

16. **Подготовка** производства сложных деталей двойной знакопеременной кривизны методом конечно-элементного анализа геометрической модели с комплексной разработкой формообразующей оснастки, развертки детали и рекомендаций по технологическому процессу / А. И. Пекарш, А. И. Олейников, В. В. Бакаев и др. // *САПР и графика.* 2009. № 2. С. 88—96.

17. **Фридляндер И. Н.** *Металловедение алюминиевых сплавов.* М.: Наука, 1985. 238 с.

18. **Исследование** применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al—Mg—Si—Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии / Е. Н. Каблов, В. В. Антипов,

Д. В. Чесноков, А. Е. Кутырев // *Авиационные материалы и технологии.* 2020. № 2. С. 63—73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.

19. **Курс М. Г.** Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В950сТ2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. № 5. С. 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.

20. **Исследование** влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В950сТ2 / Т. А. Нечайкина, Н. Е. Блинова, А. Л. Иванов и др. // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. № 10. С. 04. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36.

21. **Каблов Е. Н.** Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации "Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г." // *Авиационные материалы и технологии.* 2015. № 1. С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

22. **Каблов Е. Н., Антипов В. В., Ключкова Ю. Ю.** Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы.* 2016. № 8 (884). С. 86—91.

23. **Белов Н. А.** Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. 511 с.

24. **Кинетика** охлаждения листовых деталей из алюминиевых сплавов при малодеформационной закалке в полимерной среде / А. Л. Иванов, О. Г. Сенаторова, М. М. Митасов и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2017. № 11 (749). С. 31—36.

25. **Горев Б. В., Масанов И. Ж.** Особенности деформирования листовых конструкционных плит из алюминиевых сплавов в режимах ползучести // *Технология машиностроения.* 2009. № 7. С. 13—20.

26. **Горев Б. В.** Технология формообразования крупногабаритных деталей из листа и плит в режиме ползучести // *Технология машиностроения.* 2008. № 2. С. 11—17.

Ю. Г. КАБАЛДИН, д-р техн. наук, Д. А. ШАТАГИН, М. С. АНОСОВ, кандидаты технических наук (Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева), e-mail: uru.40@mail.ru

Синтез новых металлических материалов, включая полученных методами 3D-печати, на основе подходов нелинейной динамики и искусственного интеллекта¹

Разработана интеллектуальная система прогнозирования свойств металлических материалов. На основе специально обученной нейронной сети получена модель динамической системы синтеза новых материалов, в том числе методом 3D-печати, способная прогнозировать временные ряды, аналогичные эволюции фрактальных характеристик акустической эмиссии, излучаемой в процессе кристаллизации.

Ключевые слова: материал, нейронная сеть, моделирование, акустическая эмиссия, прогнозирование, временной ряд, фрактальная размерность, синтез.

An intelligent system for forecasting the properties of metallic materials is developed. On the basis of a specially trained neural network, a model of a dynamic system for the synthesis of new materials, including by 3D printing, is obtained, which is capable of forecasting time series similar to the evolution of fractal characteristics of acoustic emission emitted during crystallization.

Keywords: material, neural network, modeling, acoustic emission, forecasting, time series, fractal dimension, synthesis.

Управление процессами кристаллизации при синтезе новых металлических материалов — главная задача металловедения. Управление позволяет формировать структуры металлов с заданными свойствами. Для установления взаимосвязи управляющих параметров синтеза материалов с их выходными прочностными свойствами необходимо разработать информационные модели на основе искусственных нейронных сетей.

Основа синтеза новых материалов — это связь закономерностей деформирования металлических материалов и критериев устойчивости их структурного состояния при внешнем воздействии. Рассмотрим с позиций нелинейной динамики [1] новый подход к деформированию, позволяющий выявить оптимальную структуру (содержание легирующих элементов, размер зерен и т. д.) вновь создаваемых металлических материалов при их синтезе.

Согласно нелинейной динамике структуру материала следует рассматривать как динамическую систему, которая при внешнем воздействии (нагрузении) может достигать устойчивости при разном состоянии: от хаотичного движения элементов структуры на различных уровнях до самоорганизации [2, 3].

Исследования структуры металлических материалов в процессе их эволюции при деформировании, как динамической системы при нагружении, действительно позволяют говорить о новом подходе.

Деформируемое твердое тело является нелинейной динамической системой, далекой от термодинамического равновесия. Универсальное свойство нелинейных систем — периодическое чередование эволюции и инэволюции, сопровождающееся периодической трансформацией структуры (фазовым переходом) и механизмов деформации на разных ее уровнях [2]. В связи с этим накопленная энтропия может рассматриваться как критерий предельного состояния твердого тела и его устойчивости. Одной из ее разновидностей является информационная энтропия, рассчитываемая по формуле

$$S_{\text{и}} = -\sum_i p_i \log p_i,$$

где p_i — вероятность состояния динамической системы.

Следовательно, энтропию $S_{\text{и}}$ целесообразно использовать для оценки устойчивости структурного состояния материалов [1] при упругопластической деформации. Для этого выбрали ряд углеродистых сталей. На рис. 1 приведена диаграмма растяжения образцов из стали 10, при испытании которых фиксировали энергию сигнала акустической эмиссии (АЭ), рассчитывали информационную энтропию $S_{\text{и}}$ сигналов АЭ, определяли фрактальную размерность D_F по методике [1]. Видно, что при растяжении образца энтропия сигнала АЭ периодически изменяется (колебания). Образец разрушается при резком снижении энтропии (точка С).

Существуют механизмы (сценарии) развития динамического хаоса в системах [1]. Согласно Фейгенбауму [4] универсальным сценарием развития хаоса считается удвоение периода сигнала АЭ, что экспериментально показано в работе [3]: при растяжении образца на стадии предразрушения период удваивается. В результате движение структурных элементов (блоков, зерен) становится хаотичным.

Известно, что причиной пространственного временного хаоса [5, 6] является чувствительность параметров системы к начальным данным. Фрактальный характер диссипативных структур деформируемого твердого тела обусловлен теми свойствами траекторий, которые превращают их из регулярных и периодических в хаотические. Локальная сдвиговая неустойчивость зерен усложняет траекторию и делает ее непредсказуемой — структуры оп-

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-79-00135.

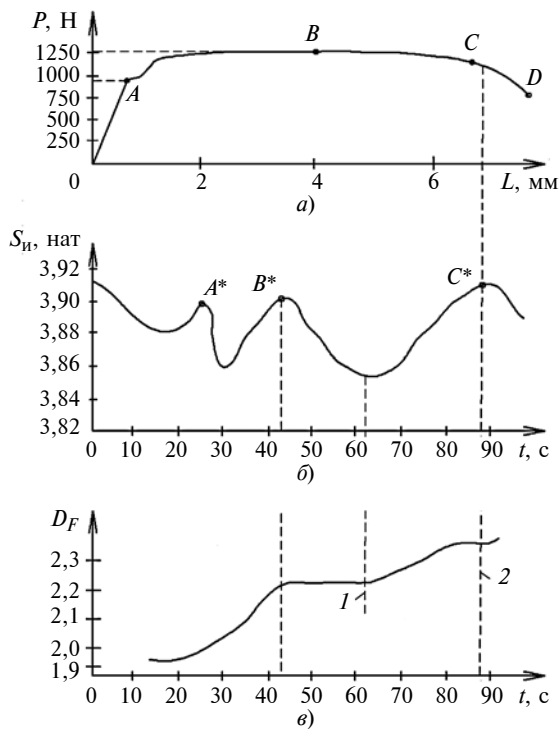


Рис. 1. Диаграммы растяжения образца из стали 10 (а), изменения информационной энтропии $S_{и}$ (б) и фрактальной размерности D_F (в):

1 — стадия потери структурной устойчивости; 2 — стадия разрушения образца металла

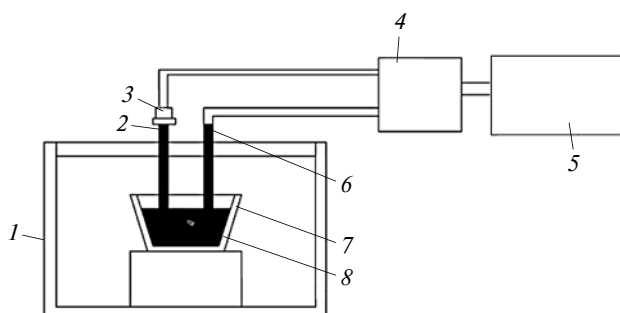


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования кристаллизации металлов:

1 — печь; 2 — звуковод; 3 — датчик АЭ; 4 — АЦП; 5 — ПК; 6 — термопара; 7 — тигель; 8 — сплав

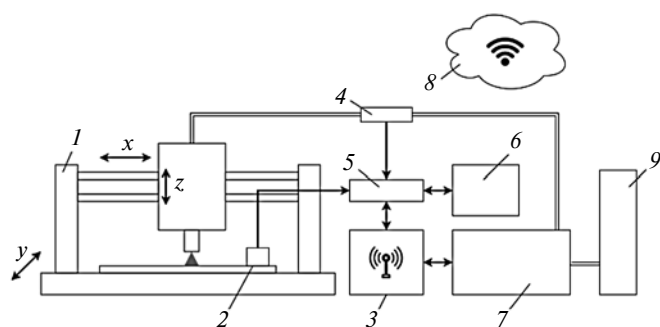


Рис. 3. Схема экспериментального стенда для получения металлов методом 3D-печати электродуговой наплавкой

ределяют характер траекторий. В результате реализуются поворотные (вихревые) моды деформации [2] на разных структурных уровнях. Рис. 1 показывает, что подходы нелинейной динамики к оценке устойчивости структуры по ее критериям, в частности по фрактальной размерности, обоснованы.

В работе [3] показано, что при растяжении образца фрактальная размерность сигнала АЭ растет, а при усталостном нагружении она также растет, но в три этапа [3]. Имеется связь фрактальной размерности и с разрушением поверхности детали [7–9].

Для лабораторных исследований синтеза новых материалов путем управления кристаллизацией с использованием ИНС и подходов нелинейной динамики разработали измерительный комплекс по изучению кристаллизации металлов, полученных как литьем (рис. 2), так и электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ (рис. 3).

В частности, стенд для изучения кристаллизации при литье (см. рис. 2) включает: измерительную ячейку — нагревательную печь с тиглем, аппаратуру для регистрации и обработки сигналов АЭ и систему измерения и записи температуры. Температуру измеряли термопарой, а для записи изменения температуры в процессе кристаллизации сплава использовали самопишущий потенциометр. Акустические колебания из зоны кристаллизации передавались через звуковод $\varnothing 2$ мм из аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Система регистрации, накопления, обработки и анализа акустико-эмиссионной информации включает пьезоэлектрический преобразователь, блок аналоговой обработки АЭ сигнала, блок АЦП и цифровой обработки АЭ сигнала. Для накопления и обработки импульсной АЭ информации использовали персональный компьютер и оригинальный пакет программ, что позволило непрерывно записывать АЭ импульсы в течение всего эксперимента и анализ акустико-эмиссионной информации по ряду параметров. Анализ предварительных результатов измерения сигналов АЭ при кристаллизации позволил выбрать ее наиболее информативные параметры: фрактальную размерность D_F и старший показатель λ Ляпунова, которые являются критериями устойчивости [1] разных сложных динамических систем.

Для комплексного лабораторного исследования кинетики кристаллизации выбрали сплавы системы олово—свинец (Sn—Pb). Выбор данной системы сплавов обоснован низкой температурой их плавления (Sn — 232 °С, Pb — 327 °С) и наличием у системы эвтектики (температура плавления — 183,5 °С). Для исследований смоделировали структурные состояния как чистых компонентов системы олово—свинец, так и сплавов с разной концентрацией компонентов (доэвтектической, околоэвтектической и заэвтектической).

Исследования проводили при скоростях охлаждения: $v_1 = 10$ °С/мин и $v_2 = 24$ °С/мин. В процессе

работы не только оценивали устойчивость структурного состояния новых синтезированных сплавов, но и прогнозировали оптимальные свойства сплавов с определенным процентным содержанием элементов системы Sn—Pb, экспериментальные исследования по определению D_F которых не проводились.

Также исследовали получение металлов с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой на стенде (см. рис. 3), который включает: 1 — порталный трехкоординатный станок с ЧПУ; 2 — широкополосный датчик АЭ; 3 — ПК с системой беспроводного доступа к облачному сервису; 4 — датчики силы тока и напряжения; 5 — АЦП/ЦАП; 6 — система ЧПУ; 7 — сварочный полуавтомат; 8 — облачный сервис; 9 — баллоны с защитным газом. Датчик температуры (пирометр) регистрирует температуру наплавки, датчик АЭ — сигналы как при печатании детали, так и при ее остывании. Все сигналы с датчиков проходят через АЦП, где преобразуются в цифровой сигнал, после чего сигналы обрабатываются.

Алгоритм прогнозирования результатов оптимизации структуры сплавов базируется на "методе окон" [10], модифицированном нами под задачу прогнозирования числовых рядов с заведомо неизвестной длиной ряда. В основе алгоритма лежит нейронная сеть — многослойный перцептрон, и задача прогнозирования формализуется через задачу распознавания образов [1]. Данные о прогнозируемой переменной за некоторый промежуток времени создают образ, класс которого определяется значением прогнозируемой переменной в некоторый момент времени за пределами данного промежутка, т. е. значением переменной через интервал прогнозирования.

Метод предполагает использование окон $\vec{W}_{вх}$ и $\vec{W}_{вых}$ с фиксированными размерами n и m соответственно. Окна могут перемещаться с некоторым шагом по временной последовательности исторических данных, начиная с первого элемента, и предназначены для доступа к данным временного ряда, причем, получив данные, окно $\vec{W}_{вх}$ передает их на вход нейронной сети, а окно $\vec{W}_{вых}$ — на выход. Получающаяся на каждом шаге пара $\{\vec{W}_{вх}; \vec{W}_{вых}\}$ используется как элемент обучающей выборки (распознаваемый образ).

В процессе обучения сети для каждого шага перемещения окон $\vec{W}_{вх}$ и $\vec{W}_{вых}$ рассчитывается значение невязки между реальностью и прогнозом, в зависимости от которого корректируются весовые коэффициенты нейронов сети [2]. Шаги обучения повторяются до тех, пока не будет достигнута последняя точка числового ряда. Затем рассчитывается суммарная погрешность прогнозирования. При большой погрешности повторяется еще раз итерация с проходом всех точек. При погрешности меньше определенного допустимого значения обучение заканчивается.

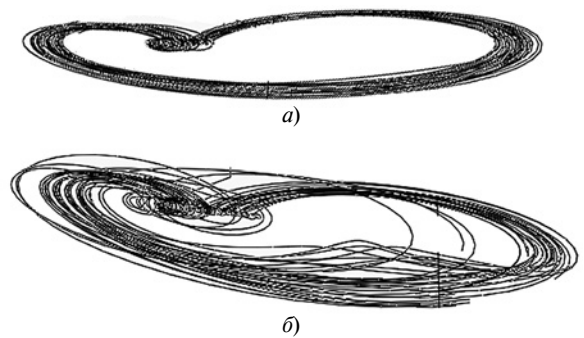


Рис. 4. Аттракторы сигнала АЭ наплавки при устойчивом ($D_F = 5,3$) (а) и неустойчивом ($D_F = 7,8$) (б) процессах структурообразования

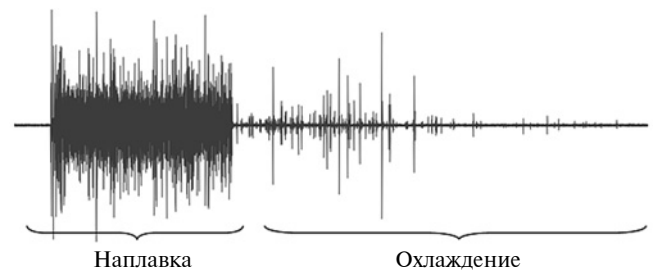


Рис. 5. Сигнал АЭ процессов наплавки и охлаждения наплавленного металла

В качестве критерия оптимальности процесса 3D-печати берется также фрактальная размерность аттрактора сигнала АЭ [11]. В процессе работы все сигналы с датчика АЭ оцифровываются и отправляются в облако на хранение и последующее переобучение нейронной сети. Таким образом, подобные системы могут накапливать опыт и обмениваться им между аналогичными системами [11]. В состав стенда по изучению 3D-печати электродуговой наплавкой (см. рис. 3) входит дополнительный нейрочип СМІК, обученный выявлять типовые дефекты наплавки. Для повышения точности определения фрактальной размерности D_F аттрактора сигнала АЭ используются специальные wavelet-фильтры, позволяющие убрать шумовую составляющую при декомпозиции сигнала на разных уровнях на полезную и вредную составляющую. На рис. 4 приведены аттракторы сигналов АЭ при разных режимах наплавки, т. е. при оптимальном (устойчивом) и неустойчивом процессе наплавки.

В работе [1] показано, что чем меньше D_F , тем устойчивее структурное состояние материала при охлаждении (кристаллизации) и выше его эксплуатационные показатели, в частности предел прочности металла. На рис. 5 приведен сигнал АЭ процессов наплавки и охлаждения наплавленного металла, полученный с использованием стенда для 3D-печати электродуговой наплавкой. Для оценки фрактальной размерности акустические сигналы (осциллограммы), полученные при кристаллизации, рассматривались как временные ряды.

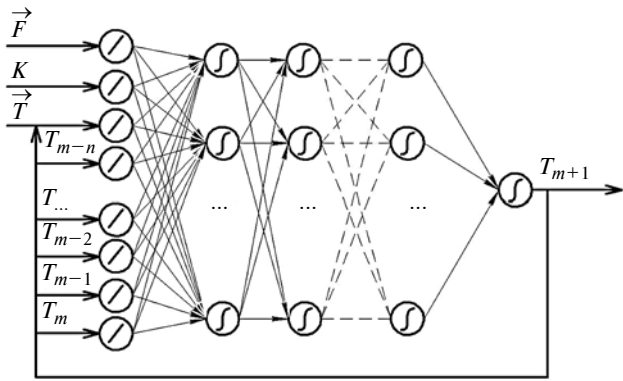


Рис. 6. Нейросеть моделирования осциллограмм сплавов Sn–Pb: F – управляющий параметр (10, 20 и 15 % Pb); K – время моделирования заданной осциллограммы; T_i, \dots, T_m – временной ряд отсчета фрактальной размерности D_F ; T – текущий элемент ряда

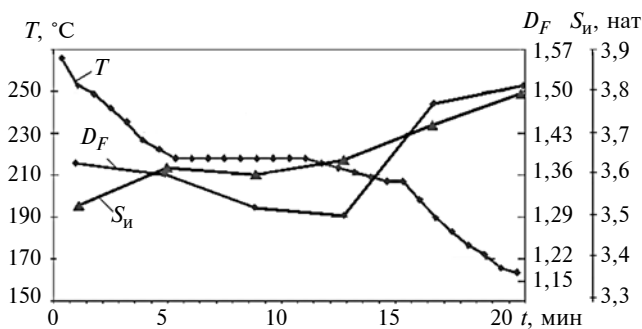


Рис. 7. Зависимости температуры T , фрактальной размерности D_F и информационной энтропии S_{inf} от времени t кристаллизации Sn

На рис. 6 показана архитектура ИНС для прогнозирования свойств литых сплавов. В качестве примера спрогнозировали временной ряд системы 85 % Sn + 15 % Pb. Алгоритм прогнозирования свойств систем Sn–Pb включал обучение нейросети (см. рис. 6), способной моделировать осциллограммы состава 90 % Sn + 10 % Pb. Обученную таким образом нейросеть затем дополнительно обучали по осциллограммам сплава 80 % Sn + 20 % Pb. После завершения обучения получили нейросеть, способную корректно моделировать осциллограммы обоих сплавов.

Для моделирования осциллограмм сплава 85 % Sn + 15 % Pb на управляющий вход обучения сети подавали указание моделировать промежуточные осциллограммы (с 15 % Pb на управляющем входе сети, см. рис. 6), т. е. получали осциллограммы в заданное время. После получения осциллограмм для каждой из них рассчитали фрактальную размерность и построили ее зависимости от времени для олова и разных систем Sn + Pb. На рис. 7 приведена температурная зависимость кристаллизации Sn от времени охлаждения. Сигналы АЭ обрабатывали на основании вейвлет-анализа. Разработанное программное обеспечение позволило получить скалограммы, построить на их основании

аттракторы и рассчитать фрактальную размерность D_F и информационную энтропию S_{inf} в процессе охлаждения металла.

Результаты экспериментальных исследований и моделирования показали, что с увеличением времени кристаллизации увеличивается и фрактальная размерность (см. рис. 7). Однако добавление 20 % Pb к Sn приводит к более позднему росту фрактальной размерности, т. е. к снижению прочностных свойств сплавов. Их улучшение, т. е. снижение интенсивности роста фрактальной размерности, достигалось увеличением скорости охлаждения при рекристаллизации.

На рис. 8 приведены осциллограммы АЭ, по которым определяли фрактальную размерность сплавов при введении в олово (Sn) 10 и 20 % свинца

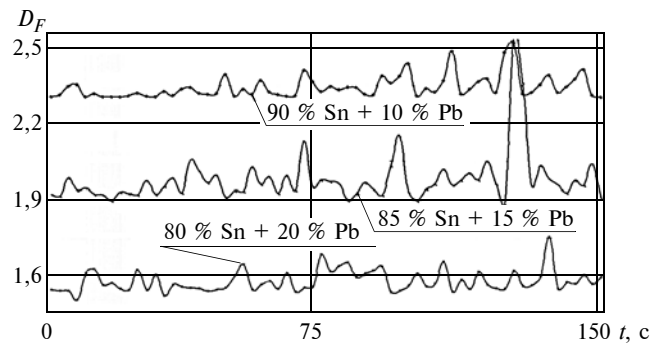


Рис. 8. Изменения фрактальных размерностей D_F сплавов Sn с содержанием Pb 10 и 20 % и 15 % (прогноз) при кристаллизации

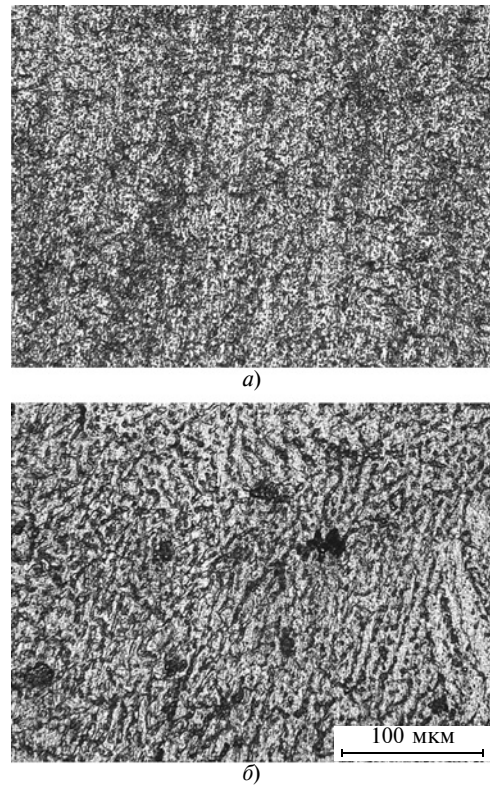


Рис. 9. Структура сплава AMg5 при устойчивом (а) и неустойчивом (б) режимах 3D-печати

ца (Pb). Приведен также прогнозируемый временной ряд для сплава 85 % Sn + 15 % Pb, показывающий его большую устойчивость по сравнению со сплавом 80 % Sn + 20 % Pb.

Таким образом, предложенный интеллектуальный подход к разработке новых материалов позволяет формировать в процессе их синтеза заданные свойства за счет управляющих входных параметров ИНС (см. рис. 6).

На рис. 9, а, б показана структура сплава AMg5, полученного 3D-печатью соответственно при устойчивом (см. рис. 4) и неустойчивом режимах.

Использование интеллектуального подхода к синтезу новых материалов методом 3D-печати позволило существенно расширить круг применяемых материалов.

По мнению экспертов, именно "интеллектуальные" технологии и "интеллектуальные" материалы в значительной степени определяют развитие как материаловедения, так и металлургических процессов XXI века.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Оценка** и диагностика структурной устойчивости металлов при низких температурах на основе подходов нелинейной динамики и искусственного интеллекта: Монография / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, М. С. Аносов и др.; Под ред. Ю. Г. Кабалдина. Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ, 2017. 210 с.
2. **Панин В. Е., Гриняев Ю. В.** Структурные уровни деформации твердых тел // Известия вузов. Физика. 1982. № 6. С. 5—27.

3. **Кабалдин Ю. Г., Муравьев С. Н.** Оценка изменений и устойчивости структуры металлических материалов при деформации на основе фрактального и вэйвлет-анализа сигналов акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 2. С. 13—20.

4. **Фейгенбаум М.** Универсальность в поведении нелинейных систем // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. № 2. С. 343—374.

5. **Малинецкий Г. Т.** Математические основы синергетики: Хаос. Структура. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 2017. 312 с.

6. **Кроновер Р. М.** Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Пастмаркет, 2000. 352 с.

7. **Трефилов В. И., Каргузов В. В., Минаков Н. В.** Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с механическими свойствами // Сб. ФИПС-99. Фракталы и прикладная синергетика. 1999. С. 10, 11.

8. **Савенков Г. Г., Барактин Б. К.** Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 6. С. 177—184

9. **Кузнецов П. В., Панин В. Е., Шрайтер Ю. В.** Фрактальная размерность как характеристика стадий деформации при циклическом активном нагружении // Сб. ФИПС-99. Фракталы и прикладная синергетика. 1999. С. 122—143.

10. **Уоссермен Ф.** Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. Изд-во "Мир", 1992. 240 с.

11. **Технология 3D-печати методом электродуговой наплавки.** Структура и механические свойства изделий при низких температурах: Монография / Ю. Г. Кабалдин, П. В. Колчин, М. С. Аносов и др.; Под ред. Ю. Г. Кабалдина. Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ, 2020. 139 с.

УДК 621.923

DOI: 10.36652/0042-4633-2021-6-71-73

Н. М. РАСУЛОВ, д-р техн. наук, М. З. АЛЕКБЕРОВ, У. М. НАДИРОВ, канд. техн. наук (Азербайджанский технический университет, г. Баку), e-mail: nariman.rasulov@yahoo.com

Повышение эффективности шлифования фасонных поверхностей с копированием

Рассматриваются технологические связи показателей качества обработки и входных параметров при шлифовании фасонных поверхностей с копированием. Предложен способ повышения качества и производительности шлифования фасонных поверхностей, который можно применить для шлифования зубьев зубчатых колес с эвольвентным профилем.

Ключевые слова: шлифование, копирование, качество, производительность, эффективность.

The technological connections of processing quality indicators and input parameters for grinding of shaped surfaces with copying are considered. A method for improving the quality and productivity of grinding shaped surfaces, which can be used for grinding the teeth of gear wheels with an involute profile, is proposed.

Keywords: grinding, copying, quality, productivity, effectiveness.

Конструкции различных деталей машин и инструментов (например, детали штампов и прессформ, эвольвентный профиль зубчатых колес, фасонные фрезы, ролики-инструменты для накатывания и прокатки различных профилей и т. д.) имеют фасонные поверхности, соответствующие их функциональному назначению [1—5]. Условия работы таких деталей требуют высокой точности и качества их поверхностей, которые, как правило, шлифуют. Шлифование фасонных поверхностей копированием обеспечивает не только высокую точность обработки, но и относительно высокую производительность [2, 3, 6—8].

Изменение условий съема материала на разных участках при шлифовании фасонных профилей копированием изменяет упругие и пластические деформации и тепловые процессы на поверхности [2, 3, 7, 9]. В результате качество и точность на

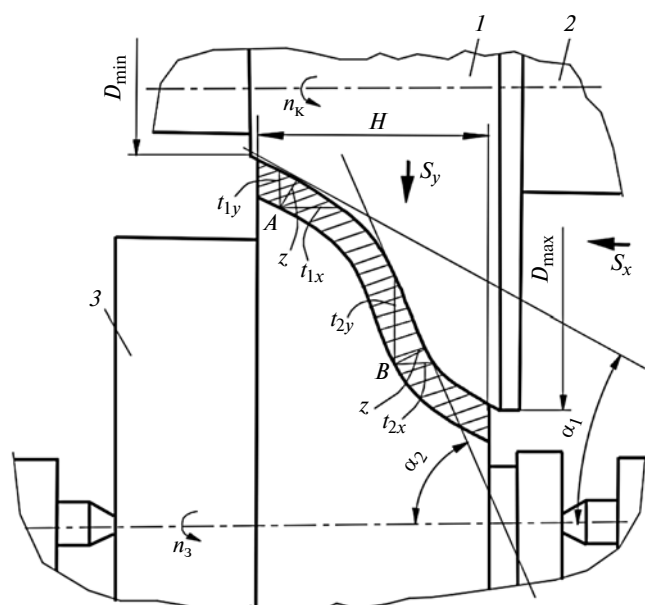


Схема шлифования фасонной поверхности вращения на круглошлифовальном станке

участках фасонных поверхностей, сформированных при шлифовании, отличаются. Стабильность качества и точности обрабатываемой поверхности обеспечивается стабильностью режима резания и параметров схемы резания по всей площади [2—5].

Чтобы определить направление повышения эффективности шлифования фасонных поверхностей, провели анализ технологических связей между параметрами качества формирования, обеспечиваемыми шлифованием, и входными параметрами [3, 7, 9, 10]. Установлено, что глубина резания как входной параметр изменяется в широком диапазоне при шлифовании фасонных профилей копированием.

Цель работы — разработка способов повышения эффективности шлифования фасонных поверхностей с копированием при обеспечении стабильности распределения глубины резания по всему фасонному профилю. Для достижения поставленной цели установили функциональные связи между глубиной резания и механизмом шлифования на примере шлифования фасонной поверхности вращения на круглошлифовальном станке (рисунок).

Допустим, что при шлифовании по всей фасонной поверхности предусмотрен постоянный припуск Z в нормальном направлении профиля. При этом при одних и тех же частотах вращения шпинделя 2 круга (n_k) и заготовки 3 (n_3) рабочая ширина абразивного круга 1 небольшая ($H = \min$) при большой разности диаметров его рабочих поперечных сечений ($D_{\max} - D_{\min} \geq \max$), интенсивность изнашивания инструмента резко изменяется по рабочему профилю; фактическая глубина резания в направлении подачи большая и изменяется в широких пределах и т. д.

Предположим, что в элементарной области обрабатываемой поверхности с меньшим углом α_1 наклона в зоне точки A угол между касательной к поверхности и направлением вертикальной подачи S_y равен $(90^\circ - \alpha_1)$, а в области с большим углом α_2 наклона в зоне точки B равен $(90^\circ - \alpha_2)$, где $\alpha_1 < \alpha_2$. При этом в зонах точек A и B профиля глубины резания соответственно t_{1y} и t_{2y} резко отличаются друг от друга — $t_{1y} \neq t_{2y}$ ($t_{1y} < t_{2y}$), и эта разность максимальна ($t_{2y} - t_{1y} \geq \max$).

В области с меньшим углом α_1 наклона поверхности (зона точки A) глубина резания минимальна:

$$t_{1y} = \frac{Z}{\sin \alpha_1} \Rightarrow \min.$$

В области с большим углом α_2 наклона поверхности (зона точки B) глубина резания максимальна:

$$t_{2y} = \frac{Z}{\sin \alpha_2} \Rightarrow \max.$$

Таким образом, максимально возможная разность предельных фактических глубин резания по шлифуемому профилю составит:

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_{2y} - t_{1y} = \frac{Z}{\sin \alpha_2} - \frac{Z}{\sin \alpha_1} = \\ &= Z \left(\frac{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}{\sin \alpha_2 \sin \alpha_1} \right) \Rightarrow \max. \end{aligned} \quad (1)$$

Следовательно, масса (объем) материала, снимаемого единицей ширины абразивного круга в зоне точки B , больше, чем в зоне точки A . Так как количество абразивных зерен на единицу площади поперечного сечения при одних и тех же диаметрах поперечного сечения инструмента постоянно, то износ круга в зоне точки B будет больше, чем в зоне точки A .

При изменении направления подачи и шлифовании с осевой подачей S_x получим аналогичную, но несколько измененную картину, т. е. $t_{1x} > t_{2x}$.

Аналогично проходит шлифование плоских фасонных поверхностей копированием и на плоских, и на плоско-копировальных станках с прямоугольными столами.

Согласно формуле (1) более равномерное распределение глубины резания по фасонному профилю при шлифовании обеспечивается при $(\alpha_1 - \alpha_2) \Rightarrow \min$.

Разработан метод шлифования, обеспечивающий минимальную разность предельных фактических глубин резания, т. е. максимально возможную стабильность глубины резания по фасонному профилю. Разработанный метод повышения эффективности шлифования фасонных профилей с равномерным распределением глубины резания применяется при шлифовании с копированием эвольвентных профилей зубьев зубчатых колес.

Для исследования использовали шестерни с числом зубьев $z = 34$, модулем $m = 5$ мм, длиной зуба $l = 25$ мм из стали 12ХН3А. Эксперименты проводили в два этапа. На каждом этапе шлифовали по четыре образца: два, термообработанных после нарезания зубьев, и два без термообработки. Во всех случаях при шлифовании в нормальном направлении припуск поверхности эвольвентного профиля приняли одинаковым — $Z = 0,30$ мм.

На первом этапе шлифовали профили зубьев шестерни при их вертикальном положении (применяемый на практике метод). Шлифование осуществляли за два черновых и два чистовых прохода. На первом и втором проходах радиальные подачи составляли 0,100 мм, на третьем — 0,06 мм и на четвертом — 0,040 мм. Фактическая скорость резания составляла $v \approx 35$ м/с; скорость двойного хода на первом—третьем переходах составляла 3000 мм/мин, на последнем проходе — 1800 мм/мин.

На втором этапе шлифовали профили зубьев при наклонном положении с поворотом до определенного угла (максимально возможный поворот) относительно вертикального их положения (предлагаемый способ обеспечивается уменьшением фактической глубины резания примерно на 50 % при каждом проходе по сравнению с первым вариантом).

Шлифование проводили за два черновых и один чистовой проход. На первом проходе радиальная подача составляла 0,180 мм, на втором — 0,09 мм и на третьем — 0,030 мм. Фактическая скорость резания — $v \approx 35$ м/с; скорость двойного хода — 3000 мм/мин за один-два прохода и 1800 мм/мин за последний проход.

После шлифования измерили параметры точности (толщину зубьев, длину общей нормали, делительный диаметр и др.) и качество поверхности (шероховатость и микротвердость поверхностного слоя). Анализы параметров точности и шероховатости шлифованных поверхностей показали, что все параметры соответствовали требованиям чертежа детали (степень точности 7С по ГОСТ 1643—81, $Ra = 2,5$ мкм).

Исследования влияния фактической глубины резания на шероховатость поверхности показали, что шлифование копированием наклонных зубьев обуславливает уменьшение шероховатости поверхности.

Микротвердость измеряли по Виккерсу [Vickers hardness: $HV(0,1)$ и $HV(0,01)$] на глубине $\delta = 15, 70, 125$ и 180 мкм от поверхности и оценивали по эвольвентному профилю поперечного сечения в середине зуба и на делительном цилиндре вдоль зуба. Исследования показали, что качество поверхностного слоя (микротвердость) при шлифовании зубьев по предложенной схеме практически не отличается от традиционного шлифования зубьев, несмотря на три рабочих прохода вместо принятых

на практике четырех, за счет уменьшения фактической глубины резания, обусловленного наклонным положением зубьев в зоне обработки.

Выводы

В результате анализа технологических связей между параметрами качества формирования, обеспечиваемыми шлифованием и входными параметрами, установлен механизм формирования неравномерности глубины резания при шлифовании фасонных поверхностей с копированием, определена максимальная разность предельных фактических глубин резания по шлифуемому профилю.

Предложен метод, обеспечивающий наибольшую стабильную глубину резания по профилю при шлифовании фасонных плоских поверхностей и поверхностей вращения.

Показано, что шлифование наклонно расположенного эвольвентно-фасонного профиля зубьев колес обуславливает значительное уменьшение объема снимаемого материала единицей ширины рабочей поверхности абразивного круга, сокращение числа рабочих проходов при обеспечении требуемого качества обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Технология** производства и методы повышения качества зубчатых колес и передач // Под общ. ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. СПб.: Профессия, 2007. 832 с.
2. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова и др. М.: Машиностроение, 2003. Т. 1. 912 с.; Т. 2. 944 с.
3. **Сулов А. Г., Дальский А. М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
4. **Black J. T., Ronald A. Kohser.** DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing, 13th Edition, Edition Wiley, 2019, 896 p.
5. **Fritz Klocke, Wilfried König.** Fertigungsverfahren, Schleifen, Honen, Läppen. 4., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 494 p.
6. **Lisichenko N. V., Larshyn V. P., Nezhebovskiy V. V.** Studying of the quality of the surface layer of gears with profile grinding. Cutting Tools Technology System. 2018. 89 (101). P. 88—99.
7. **Макаров В. Ф., Никитин С. П., Норин А. О.** Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 5. С. 17—24, DOI: 10.12737/18710.
8. **Расулов Н. М., Шабиев Э. Т.** Повышение эффективности шлифования зубьев зубчатых колес методом копирования на основе управления глубиной резания // Известия вузов. Машиностроение. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. № 2. С. 71—78.
9. **Крюков С. А., Славин А. В., Байдакова Н. В.** Аналитическое определение эксплуатационных параметров профиля поверхности шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 61—63
10. **Расулов Н. М., Надиров У. М., Алекберов М. З.** Обобщенная система технологических связей при механической обработке и ее применение // Вестник машиностроения. 2020. № 7. С. 38—41.

В. П. ТАБАКОВ, д-р техн. наук (Ульяновский ГТУ), С. В. СИЗОВ (АО "Ульяновский механический завод"),
e-mail: vpt1947@yandex.ru, serg.sizov24@yandex.ru

Импульсная лазерная обработка твердосплавного режущего инструмента с многослойным покрытием¹

Исследовано влияние импульсной лазерной обработки (ИЛО) на структурные параметры и механические свойства однослойных и многослойных покрытий. Представлены контактные показатели при резании, показатели теплового и напряженного состояния режущего клина инструмента с многослойными покрытиями, прошедших ИЛО. Показана эффективность ИЛО для твердосплавного режущего инструмента с многослойным покрытием.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка, твердосплавный режущий инструмент, многослойное покрытие, структурные показатели, показатели механических свойств, период стойкости.

The influence of pulsed laser treatment (PLT) on the structural parameters and mechanical properties of single-layer and multilayer coatings is investigated. The contact indicators during cutting, indicators of the thermal and stressed state of the cutting wedge of a tool with multilayer coatings that have passed the PLT are presented. The effectiveness of PLT for multi-coated carbide cutting tool is shown.

Keywords: pulsed laser processing, carbide cutting tool, multilayer coating, structural indicators, indicators of mechanical properties, durability period.

Разработанные в конце прошлого столетия однослойные износостойкие покрытия [1–4], а затем и многослойные покрытия [5–7], применяемые для режущих инструментов, существенно повысили их работоспособность. В настоящее время активно ведутся исследования по разработке многослойных покрытий с наноразмерными слоями разной функциональности для дальнейшего повышения эффективности инструмента [8–10]. Несмотря на значительные успехи в данной области, в ряде случаев эффективность инструментов с покрытиями не достаточная, что обуславливает необходимость в дальнейших исследованиях по поиску новых соста-

вов и конструкций износостойких покрытий и разработке новых технологий.

Анализ публикаций показал, что применяемые в настоящее время покрытия разработаны на основе нитрида титана или его модификаций, возможности которых практически уже исчерпаны, что побуждает искать новые пути повышения эффективности покрытий. Одним из перспективных направлений в этой области является дополнительная упрочняющая обработка режущего инструмента с покрытием, направленная на повышение физико-механических свойств материала и прочной адгезии покрытий с основой инструмента. В качестве дополнительной обработки применяют: ионное азотирование, ионную имплантацию, импульсную лазерную обработку. Из всех методов дополнительной упрочняющей обработки следует отметить импульсную лазерную обработку (ИЛО). Широкое распространение лазерной технологии и производственные возможности делают данное упрочнение доступным практически для любого режущего инструмента, в том числе и со сложной формой режущей кромки.

Цель настоящей работы — исследование влияния ИЛО на параметры структуры, механические свойства многослойных покрытий и работоспособность твердосплавного режущего инструмента.

Нанесение покрытий осуществляли на установке Булат-6 с использованием катодов из титана и циркония; сплавов титана, алюминия и титана; ниобия и алюминия. Параметры структур покрытий (период a кристаллической решетки, полуширина β_{111} рентгеновской дифракционной линии) и остаточные сжимающие напряжения σ_0 исследовали на дифрактометре ДРОН-3М, относительную микродеформацию кристаллической решетки $\Delta a/a$ и размеры D блоков областей когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали по методике, приведенной в работе [11]. ИЛО твердосплавных пластин осуществляли на лазерной технологической установке Квант-15 импульсного действия. Микротвердость H_μ покрытий определяли методом, изложенным в работе [12], на микротвердомере Mitutoyo NH-125 с использованием пирамиды Кнуппа. Адгезион-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, Проект № 18-48-730011.

Показатели механических свойств покрытий

Покрытие	H_{μ} , ГПа	E , ГПа	H_{μ}/E	H_{μ}^3/E^2 , ГПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	K_0
TiN	$\frac{24,2}{27,3}$	$\frac{315}{358}$	$\frac{0,077}{0,076}$	$\frac{0,143}{0,159}$	$\frac{7,6}{7,77}$	$\frac{0}{0}$
TiZrN	$\frac{36,4}{40,1}$	$\frac{385}{429}$	$\frac{0,094}{0,093}$	$\frac{0,320}{0,350}$	$\frac{8,73}{8,97}$	$\frac{0,11}{0,05}$
TiNbAlN	$\frac{38,9}{42,8}$	$\frac{402}{442}$	$\frac{0,097}{0,097}$	$\frac{0,364}{0,401}$	$\frac{11,73}{12,04}$	$\frac{0,13}{0,07}$
TiZrNbAlN	$\frac{42,8}{47,7}$	$\frac{440}{487}$	$\frac{0,097}{0,098}$	$\frac{0,404}{0,458}$	$\frac{10,41}{10,73}$	$\frac{0,89}{0,47}$
TiZrAlN	$\frac{41,5}{46,5}$	$\frac{424}{473}$	$\frac{0,098}{0,098}$	$\frac{0,397}{0,449}$	$\frac{12,32}{12,68}$	$\frac{0,61}{0,25}$

Примечание. В числителе значения для покрытий без ИЛО, в знаменателе — с ИЛО.

ную прочность покрытий оценивали по коэффициенту K_0 отслоения, который определяли с помощью твердомера ТК-2М методом, представленным в работе [2]. Для оценки трещиностойкости композиции "покрытие — инструментальная основа" измеряли критический коэффициент K_{1C} интенсивности напряжений методом вдавливания алмазного индентора (пирамида Виккерса) с использованием твердомера ТК-2М [16]. Работоспособность режущего инструмента оценивали по периоду T_c стойкости при точении заготовок из сталей 38ХГН и 12Х18Н10Т; использовали сменные многогранные пластины из твердого сплава МК8 (СП "МКТС-HERTEL", Россия).

Исследовали многослойные покрытия TiN—TiNbAlN, TiZrN—TiZrNbAlN, TiN—TiZrN—TiNbAlN и TiN—TiZrN—TiZrAlN в сравнении с покрытием TiN. Химические составы функциональных слоев многослойных покрытий представлены в табл. 1.

ИЛО твердосплавных пластин с многослойными покрытиями, согласно рекомендациям работы [13], проводили при плотности мощности лазерного излучения $q = 5100$ Вт/см². Влияние ИЛО на структурные параметры и механические свойства функциональных слоев многослойных покрытий представлены соответственно в табл. 2 и 3.

Исследования показали, что ИЛО для твердосплавных пластин МК8 с покрытиями практически не влияет на период кристаллической решетки покрытий, повышает полуширину рентгеновской

Таблица 1

Химический состав покрытий, ат. %

Покрытие	Ti	Zr	Nb	Al
TiN	100	—	—	—
TiZrN	57,2	42,80	—	—
TiZrAlN	57,4	39,80	—	2,80
TiNbAlN	82,9	—	15,50	1,60
TiZrNbAlN	49,7	39,12	10,37	0,81

Таблица 2

Структурные параметры покрытий на твердосплавных пластинах МК8

Покрытие	a , нм	β_{111}°	σ_0 , МПа	D , нм
TiZrAlN	$\frac{0,4332}{0,4344}$	$\frac{1,13}{1,36}$	$\frac{-1293 \pm 135}{-1060 \pm 90}$	$\frac{8,0}{7,0}$
TiNbAlN	$\frac{0,4309}{0,4309}$	$\frac{0,53}{0,70}$	$\frac{-857 \pm 158}{-623 \pm 84}$	$\frac{18,0}{13,0}$
TiZrNbAlN	$\frac{0,4379}{0,4379}$	$\frac{0,75}{0,86}$	$\frac{-554 \pm 73}{-287 \pm 59}$	$\frac{13,0}{11,0}$

Примечание. В числителе значения для покрытий без ИЛО, в знаменателе — с ИЛО.

Таблица 4

Показатели механических свойств многослойных покрытий

Покрытие	H_{μ} , ГПа	E , ГПа	H_{μ}/E	H_{μ}^3/E^2 , ГПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	K_0
TiN—TiZrN—TiZrAlN	$\frac{39,8}{43,6}$	$\frac{427}{467}$	$\frac{0,093}{0,093}$	$\frac{0,346}{0,380}$	$\frac{14,41}{14,65}$	$\frac{0,32}{0,19}$
TiN—TiZrN—TiNbAlN	$\frac{35,7}{39,2}$	$\frac{343}{391}$	$\frac{0,104}{0,1}$	$\frac{0,387}{0,394}$	$\frac{13,05}{13,23}$	$\frac{0,37}{0,13}$
TiN—TiZrN—TiZrNbAlN	$\frac{37,5}{41,2}$	$\frac{411}{445}$	$\frac{0,091}{0,093}$	$\frac{0,312}{0,353}$	$\frac{13,45}{13,84}$	$\frac{0,42}{0,12}$

Примечание. В числителе значения для покрытий без ИЛО, в знаменателе — с ИЛО.

линии на 14,7÷32,1 %, снижает размеры кристаллитов нитридной фазы TiN (блоков ОКР) на 9÷26,3 % и остаточные сжимающие напряжения на 18÷48,2 % в зависимости от состава покрытия.

ИЛО повышает микротвердость на 10÷12,8 % и модуль упругости на 10÷13,7 % (см. табл. 3). Наибольшее влияние ИЛО оказывает на коэффициент K_0 отслоения, который уменьшается на 46,2÷59 %, что объясняется релаксацией напряжений на границе покрытия с твердосплавной основой и свидетельствует о повышении прочности адгезии. Анализ показывает, что критический коэффициент K_{1C} интенсивности напряжений и стойкость H_{μ}/E покрытий к упругой деформации разрушения после ИЛО практически не изменяются, а сопротивление H_{μ}^3/E^2 пластическому деформированию возрастает на 9÷13 %.

Влияние ИЛО на механические свойства многослойных покрытий показывают данные табл. 4.

Таблица 5

Интенсивность J изнашивания твердосплавных пластин с многослойными покрытиями, 10^{-4} мм/м

Покрытие	Режим обработки	
	$v = 180$ м/мин; $S = 0,15$ мм/об; $t = 0,5$ мм	$v = 130$ м/мин; $S = 0,3$ мм/об; $t = 0,5$ мм
TiN—TiZrN—TiZrAlN	$\frac{1,06}{0,87}$	$\frac{1,17}{0,97}$
TiN—TiZrN—TiNbAlN	$\frac{1,05}{0,81}$	$\frac{1,14}{0,94}$
TiN—TiZrN—TiZrNbAlN	$\frac{1,13}{0,92}$	$\frac{1,33}{1,12}$

Примечание. В числителе значения для покрытий без ИЛО, в знаменателе — с ИЛО.

Исследованиями установлено, что влияние ИЛО на механические свойства многослойных покрытий аналогично влиянию на свойства однослойных покрытий.

ИЛО повышает микротвердость покрытий в среднем на $9 \div 9,5$ %, модуль упругости на $8 \div 13$ % в зависимости от состава функциональных слоев многослойных покрытий. Как и при однослойном покрытии, ИЛО практически не влияет на критический коэффициент K_{1C} , стойкость покрытий к упругой деформации разрушения и повышает сопротивление пластическому деформированию. Наибольшее влияние ИЛО оказывает на прочность адгезии, о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения в $1,7—3,5$ раза.

Таким образом, ИЛО твердосплавных пластин с многослойными покрытиями улучшает механические свойства и прочность адгезии, что снижает интенсивность их изнашивания.

Проведены исследования интенсивности изнашивания твердосплавных пластин с многослойными покрытиями при продольном точении заготовок из стали 38ХГН. Режимы резания: $v = 180$ м/мин, $t = 0,5$ мм, $S = 0,15$ мм/об и $S = 0,3$ мм/об. Результаты представлены в табл. 5. Установлено, что ИЛО снижает интенсивность изнашивания твердосплавных пластин с многослойными покрытиями на $16 \div 23$ %.

Для оценки эффективности ИЛО исследовали контактные процессы, тепловое и напряженное состояния и работоспособность твердосплавных пластин с многослойными покрытиями.

Показатели процесса резания исследовали при точении заготовок из стали 38ХГН по методике, изложенной в работах [14, 15], которая включала в себя определение полной длины C_γ контакта стружки с передней поверхностью, коэффициента K_L укорочения стружки, угла β сдвига, нормальных (N) и касательных (F) усилий на переднюю поверхность инструмента, среднего коэффициента трения μ , средних нормальных (q_N) и касательных (q_F) удельных нагрузок, нормальных (σ_N) и касательных (τ_F) контактных напряжений на передней поверхности инструмента. Тепловое и напряженное состояния режущего клина определяли с помощью ППП ANSYS. Некоторые результаты исследований представлены в табл. 6 и на рис. 1.

Установлено, что ИЛО значительно изменяет показатели процесса резания. Так, при режиме резания: $v = 130$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 0,75$ мм, наблюдались снижение длины контакта стружки с передней поверхностью на $11,2 \div 11,5$ %, уменьшение коэффициента укорочения стружки на $6,7 \div 9,1$ % и составляющих P_z , P_y и P_x силы резания на $4 \div 9,8$ % в зависимости от конструкции многослойного покрытия. При этом средние нормальные и касательные контактные нагрузки увеличились на

Таблица 6

Контактные показатели при резании для разных пластин с разной обработкой

Режим обработки	Покрытие	C_γ , мм	K_L	N , Н	F , Н	q_N , МПа	q_F , МПа	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
$v = 130$ м/мин $S = 0,3$ мм/об $t = 0,75$ мм	TiN	0,65	1,92	508	257	737	373	497	278	145
	TiN + ИЛО	0,58	1,76	492	241	799	392	482	264	134
	TiN—TiZrN—TiZrAlN	0,71	1,98	517	233	687	309	508	272	101
	TiN—TiZrN—TiZrAlN + ИЛО	0,63	1,80	500	218	748	327	492	258	93
	TiN—TiZrN—TiZrNbAlN	0,69	2,09	528	252	721	344	517	289	112
	TiN—TiZrN—TiZrNbAlN + ИЛО	0,61	1,85	506	239	781	369	496	277	101
$v = 170$ м/мин $S = 0,15$ мм/об $t = 0,5$ мм	TiN	0,47	1,76	198	96	597	289	198	102	68
	TiN + ИЛО	0,33	1,55	182	82	780	351	183	87	61
	TiN—TiZrN—TiZrAlN	0,55	1,88	207	118	533	302	205	119	81
	TiN—TiZrN—TiZrAlN + ИЛО	0,38	1,70	184	102	684	379	183	100	77
	TiN—TiZrN—TiZrNbAlN	0,51	1,90	212	119	589	331	210	115	90
	TiN—TiZrN—TiZrNbAlN + ИЛО	0,39	1,78	195	106	708	383	194	102	82

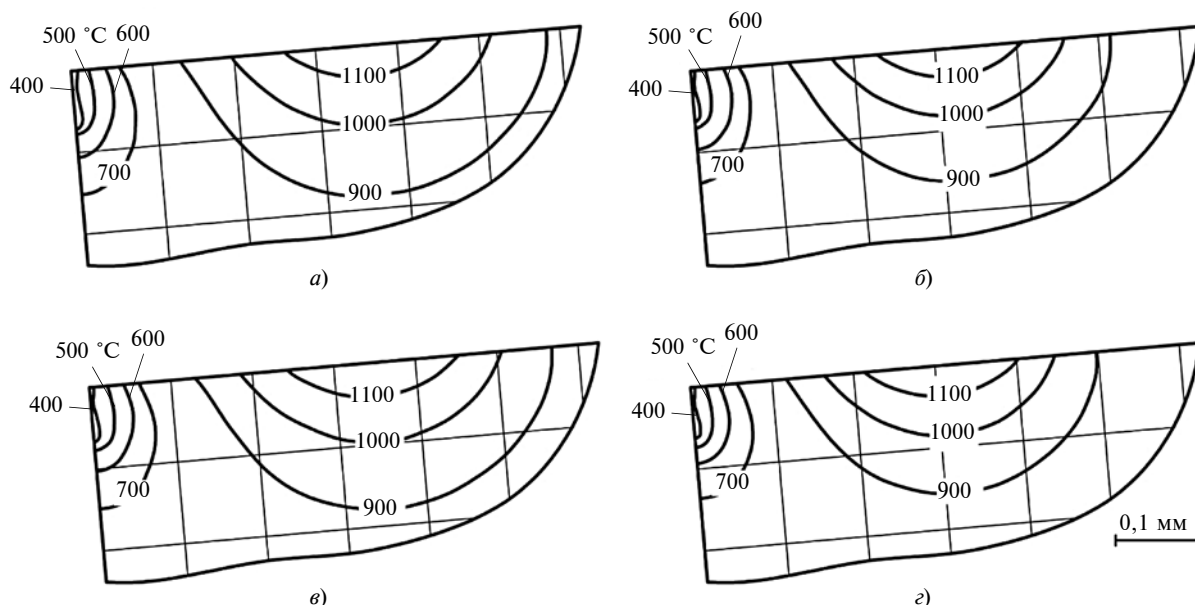


Рис. 1. Распределение температур T в режущем клине твердосплавных пластин при $v = 130$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 0,75$ мм с покрытиями:

a – TiN–TiZrN–TiZrAlN; b – TiN–TiZrN–TiZrAlN + ИЛО; c – TiN–TiZrN–TiZrNbAlN; d – TiN–TiZrN–TiZrNbAlN + ИЛО

5,8÷8,3 %. При резании на более высокой скорости при меньших значениях подачи и глубины резания (см. табл. б) изменения показателей процесса резания для инструмента, прошедшего ИЛО, были более существенными.

ИЛО снижает мощность теплового потока, незначительно повышает его интенсивность на передней поверхности инструмента, уменьшает контактные температуры на передней и задней поверхностях инструмента на 5,6÷14,2 % в зависимости от конструкции многослойного покрытия и режима резания. Уменьшение длины контакта стружки с передней поверхности после ИЛО сдвигает изотермы температур в режущем клине в направлении к задней поверхности, а уменьшение теплового потока — в направлении к передней поверхности (см. рис. 1).

ИЛО повышает контактные нормальные и касательные напряжения на передней поверхности. Расчеты напряжений в режущем клине показали, что изобары напряжений в результате снижения полной длины контакта стружки с передней поверхностью при применении ИЛО смещаются в сторону задней поверхности инструмента, а глубина их залегания уменьшается.

Исследование работоспособности твердосплавных пластин с многослойными покрытиями проводили при продольном точении заготовок из сталей 38ХГН и 12Х18Н10Т. Результаты исследований представлены на рис. 2 и 3. Установлено, что многослойные покрытия на твердосплавных пластинах, прошедшие ИЛО, при обработке заготовок из стали 38ХГН обеспечивают выше период стойкости в

1,48—1,7 раза и в 2,7—4,2 раза по сравнению с пластинами с покрытием из TiN.

Однако при обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т эффективность твердосплавных пластин с многослойными покрытиями после ИЛО ниже. Коэффициент повышения периода стойкости в данном случае составил 1,34÷1,4. Это объясняется более высокими тепловыми и силовыми нагрузками, возникающими при обработке материалов данной группы, так как покрытие, имеющее более

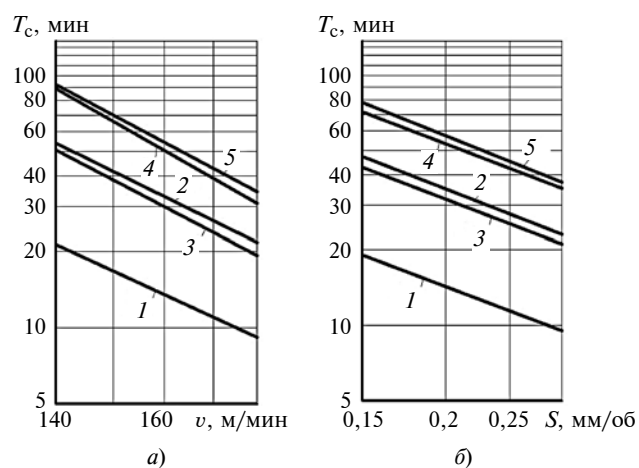


Рис. 2. Зависимости периода T_c стойкости пластин без ИЛО (1–3) и с ИЛО (4, 5) от скорости v резания (а) и подачи S (б) при точении заготовок из стали 38ХГН при $S = 0,21$ мм/об, $t = 0,5$ мм (а) и при $v = 160$ м/мин, $t = 0,5$ мм (б):

1 — для пластин с покрытием TiN; 2, 5 — TiN–TiZrN–TiNbAlN; 3, 4 — TiN–TiZrN–TiZrAlN

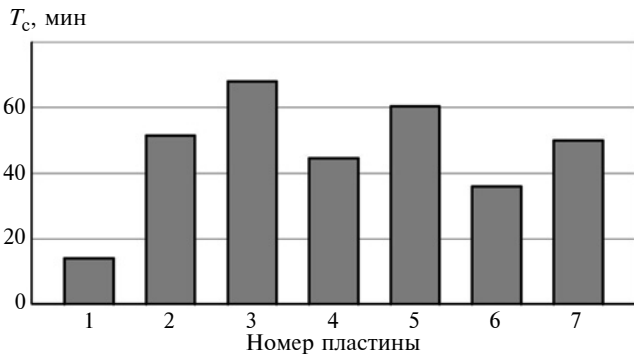


Рис. 3. Диаграмма периода T_c стойкости пластин с покрытиями из TiN (1); TiZrN—TiNbAlN—TiZrNbAlN (2, 3); TiN—TiZrN—TiNbAlN (4, 5); TiN—TiZrN—TiZrAlN (6, 7) при точении заготовок из стали 12X18H10T при $v = 140$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 0,5$ мм (пластины 1, 2, 4, 6 без ИЛО; пластины 3, 5, 7 с ИЛО)

высокую твердость в результате воздействия ИЛО, имеет меньшую сопротивляемость.

Повышение периода стойкости твердосплавных пластин с многослойными покрытиями, прошедших ИЛО, объясняется снижением тепловой напряженности режущего клина, повышением механических свойств и прочности адгезии многослойного покрытия в результате ИЛО.

Экспериментальные исследования твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями в условиях действующего производства подтвердили эффективность применения ИЛО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Верещака А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Табаков В. П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
3. **Кабалдин Ю. Г., Мокрицкий Б. Я., Изотов С. А.** Повышение работоспособности и надежности рабочей части инструмента с покрытием // Известия вузов. 1987. № 1. С. 141—142.
4. **Мокрицкий Б. Я.** Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путем управления свой-

ствами инструментального материала. Комсомольск н/А: Комсомольский-на-Амуре ГУ, 2010. 232 с.

5. **Методологические** подходы к формированию многослойных покрытий на режущем инструменте / В. П. Табаков, А. С. Верещака, А. А. Верещака, А. Д. Батако // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 82—88.

6. **Табаков В. П., Худобин Л. В.** Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. № 9. С. 414—416.

7. **Tabakov V. P., Vereschaka A. S.** Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining condition // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 581. P. 55—61.

8. **Investigation** of wear and diffusion processes on rake faces of carbide inserts with Ti—TiN—(Ti, Al, Si)N composite nanostructured coating / A. Vereschaka, V. Tabakov, S. Grigoriev en. ot. Wear. 2018. N. 416, 417. P. 72—80.

9. **Investigation** of wear dynamics for cutting tools with multilayer composite nanostructured coatings in turning constructional steel / A. Vereschaka, V. Tabakov, S. Grigoriev en. ot. Wear. 2019. N. 420, 421. P. 17—37.

10. **Effect** of adhesion and the wear-resistant layer thickness ratio on mechanical and performance properties of ZrN—(Zr, Al, Si)N coatings / A. Vereschaka, V. Tabakov, S. Grigoriev // Surface and Coatings Technology. 2019. N. 357. P. 218—234.

11. **Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А.** Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ металлов. М.: Metallurgizdat, 1970. 366 с.

12. **Табаков В. П., Чихранов А. В.** Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 292—297.

13. **Сизов С. В., Табаков В. П.** Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию "твердосплавная основа — износостойкое покрытие" // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 80—84.

14. **Резников А. Н.** Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

15. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

16. **Майстренко А. Л., Дуб С. Н.** Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и трещиностойкости // Заводская лаборатория. 1991. № 2. С. 52—54.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА "ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ"

Подписка на журнал принимается по каталогу:

"Пресса России" — индекс **27841**



М. Ф. СЕЛЕМЕНЕВ, канд. техн. наук (Орловский ГУ им. И. С. Тургенева),
И. Н. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук (Российский государственный аграрный
университет — МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия),
Ю. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук (Орловский государственный аграрный
университет им. Н. В. Парахина), С. А. ВЕЛИЧКО, д-р техн. наук
(Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск), М. Н. ЕРОФЕЕВ, д-р техн. наук
(ИМАШ им. А. А. Благодирова РАН), Т. Н. БОРОВИК
(МИРЭА — Российский технологический университет, Москва),
Е. А. ПРОСОЛОВ, Е. М. СЕЛЕМЕНЕВА (Орловский ГУ
им. И. С. Тургенева), e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Моделирование низкоскоростной механической обработки материалов с использованием систем DEFORM-3D и SolidWorks

Проанализированы программные продукты для моделирования низкоскоростной механической обработки материалов с использованием CAD/CAE-систем проектирования SolidWorks и DEFORM-3D. Установлены: оптимальный размер конечного элемента, влияние нанопленок эпилама на тепловые процессы в зависимости от режима обработки, влияние силы трения на напряжения рабочей контактной поверхности режущего инструмента.

Ключевые слова: механическая обработка, нанопленка эпилама, контактные напряжения, моделирование, эпиламированное покрытие, смазочно-охлаждающая технологическая среда, системы автоматизированного проектирования SolidWorks и DEFORM-3D.

Software products for simulating low-speed mechanical processing of materials using SolidWorks and DEFORM-3D CAD / CAE-design systems are analyzed. The optimal size of the finite element, the effect of epilam nanofilms on thermal processes depending on the processing mode, the effect of the friction force on the stresses of the working contact surface of the cutting tool are determined.

Keywords: mechanical processing, epilam nanofilm, contact stresses, modeling, epilamated coating, lubricating and cooling technological medium, SolidWorks and DEFORM-3D CAD systems.

Развитие машиностроения определяется решением комплексных задач по созданию или выбору условий (методов) обработки, обеспечивающих высокие (требуемые) эксплуатационные свойства деталей путем изыскания и оптимизации технологических приемов изготовления, преобразования исходного материала и его поверхностного слоя.

Управление технологическими операциями позволяет получить поверхностный слой, отвечающий необходимым требованиям и техническим условиям.

Для получения заданных размеров, качества и геометрии детали определяющее значение имеет инструмент, обеспечивающий повышенную чистоту и точность обработки поверхности.

Формообразование проходит со снятием и без снятия стружки. В связи с этим инструменты разделяют на режущие и деформирующие. К режущим относятся инструменты, осуществляющие снятие стружки при зенкеровании, развертывании, нарезании резьбы, протягивании. К деформирующим относятся инструмен-

ты, осуществляющие накатывание и раскатывание резьбы, центробежную обработку, выглаживание, дорнование, т. е. работающие без снятия стружки. Все инструменты, а главное осуществляемые ими процессы, объединяют сравнительно невысокие скорости формообразования, позволяющие применять нанопленки эпилама для защиты их рабочих поверхностей [1—4].

Трение в зоне контакта инструмента и детали при обработке можно уменьшить применением смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), снижающих пластическую деформацию при механической обработке материалов и, как следствие, уменьшающих силу резания и потребляемую мощность, а также способствующих повышению стойкости инструмента и качества обработанной поверхности [5, 6]. Одним из перспективных способов увеличения проникающей способности СОТС и повышения стойкости режущих поверхностей является нанесение на них специальных покрытий [7, 8].

К достаточно современной и актуальной системе (CAE) моделирования технологических процессов механической обработки относится и программный комплекс DEFORM-3D [9, 10], который предназначен для трехмерного анализа поведения материалов, а также моделирования процессов пластических деформаций. Комплекс DEFORM-3D предоставляет параметры "течения" материала при его пластической деформации, а также распределение температур. Работа комплекса основана на методе конечных элементов, а исходными данными является модель объекта в виде системы дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями.

Отметим, что при значительном отличии друг от друга процессов формообразования [11]

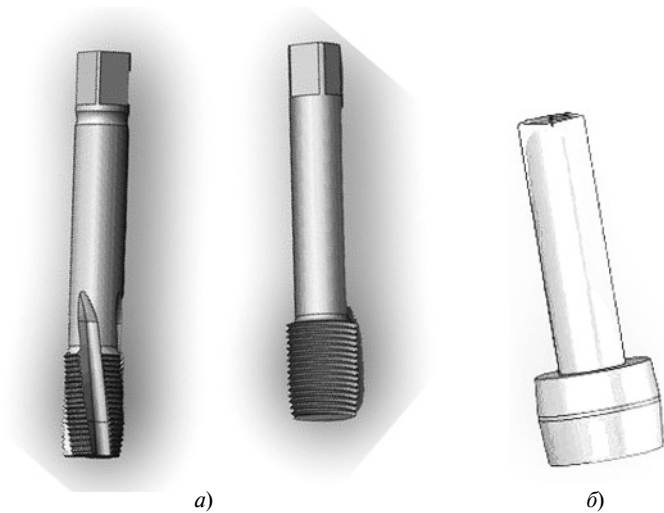


Рис. 1. Трехмерные модели метчика и раскатника (а) и дорна (б), выполненные в системе SolidWorks

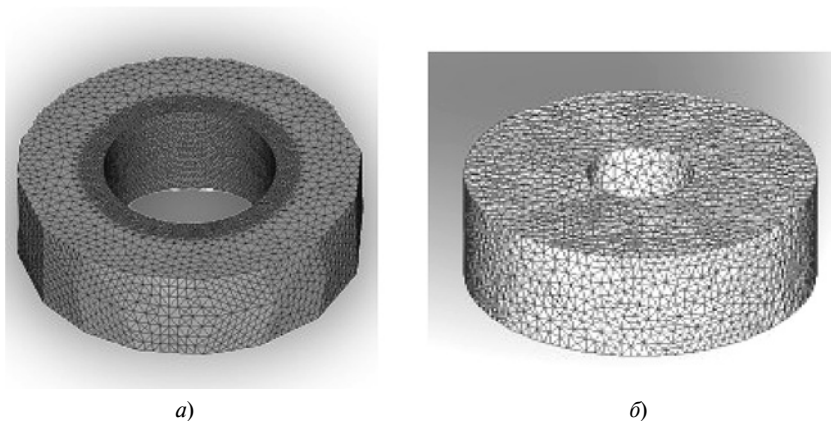


Рис. 2. Разбиение заготовки на элементы при дорновании (а) и резьбонарезании (б)

практически все вводимые параметры и условия моделирования будут разными для каждого метода.

Из существующих зарубежных (AutoCad, CATIA, Pro/Engineer и т. д.) и отечественных (Т-FLEX CAD, КОМПАС-3D, ADEM, ГеММа-3D, LS-DYNA, CAE и др.) CAD-систем [12–14] наиболее широкие возможности для создания 3D-моделей имеет программный пакет SolidWorks [14, 15], позволяющий работать как с пространственными телами, так и с поверхностями. Как и другие системы, данный комплекс является совокупностью менее сложных элементов или примитивов, объединенных специальными операциями. Причем данное объ-

единение можно редактировать заменой имеющихся элементов другими (рис. 1). С помощью данного пакета можно проводить как анализ геометрических параметров трехмерных моделей, так и расчеты прочностных, механических, технологических и других свойств деталей.

Таким образом, решается первая поставленная задача работы, заключающаяся в анализе оптимальных геометрических параметров инструмента.

Широкий выбор типов файлов (STEP, STL, IGES, ACIS и др.) при конвертировании модели в другой формат позволяет импортировать созданные детали в другие системы для дальнейших расчетов. Это доказывает возмож-

ность использования данных моделей в системе DEFORM-3D [9, 10].

Модель делится на конечные элементы (рис. 2) с соблюдением достаточной точности сетки, а значит и точности расчетов в очаге деформации, которые зависят от параметров разделения. Максимальные и минимальные размеры конечного элемента при введении параметров разделения составили соответственно 0,04 и 0,01 мм, что достаточно для аппроксимации [11]. Таким образом, число элементов составило $\approx 80\,000$.

Чтобы обеспечить высокую точность моделирования в системе DEFORM-3D необходимо иметь четкое представление о физических параметрах, которые будут смоделированы. Для этого в программе из нескольких наборов данных о свойствах материала выбирают те, которые можно смоделировать и проанализировать по параметрам: пластические и упругие свойства материалов; тепловые и диффузионные данные обработки; рост зерен обрабатываемого материала; данные о твердости и хрупкости материалов. Эти параметры позволяют конкретизировать требуемые выходные значения моделирования, что повышает точность полученных данных и уменьшает время их расчета.

Следующий этап моделирования процесса механической обработки — импортирование созданной трехмерной модели инструмента (рис. 3). Для этого 3D-модели инструментов сохраняются в формате файлов для стереолитографии (*.stl) в системе трехмерного моделирования SolidWorks [14].

Устанавливается коэффициент трения в зоне контакта заготовки и инструмента, необходимый для расчетной оценки контактных напряжений. При нанесении на поверхность инструмента фторированных ПАВ из растворов эпиламов коэффици-

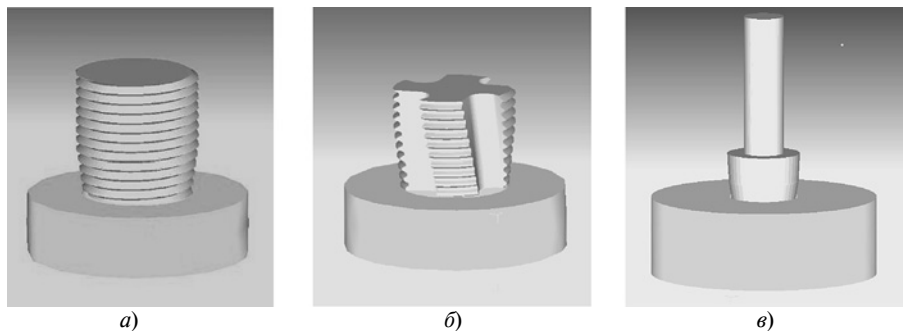


Рис. 3. Рабочая поверхность инструмента при раскатывании (а), резбонарезании (б) и дорновании (в)

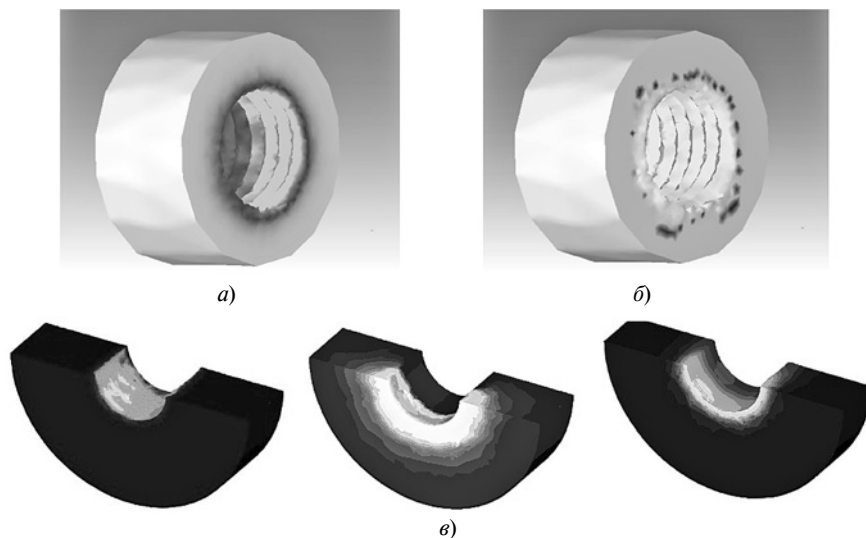


Рис. 4. Поля напряжений, деформаций и температур в заготовках при обработке режущим (а) и деформирующим (б) инструментами

ент трения значительно снижается [3]. За счет высокой адсорбции полученная тонкая пленка достаточно прочно удерживается на обработанной поверхности.

Для получения требуемой точности данных ввели коэффициент теплообмена взаимодействия инструмента и заготовки.

С учетом траектории движения инструмента в процессе механической обработки заготовки в качестве расчетного принят "временной шаг". Все характеристики и параметры модели сохраняются в базе данных после окончания ввода граничных условий.

Анализ данных в системе DEFORM осуществляет постпроцессор, который обрабатывает и выводит данные о механической

обработке в виде полей напряжений, деформаций и температур на трехмерных моделях заготовки и инструмента, а также в виде графиков и диаграмм (рис. 4).

Заключение

При моделировании процессов формообразования в системе DEFORM-3D рекомендуется разбивать заготовки на конечные элементы размером $0,01 \div 0,04$ мм, что обеспечивает сравнительно небольшое количество элементов и сокращает время расчетов.

Для анализа влияния нанопленки эпилама на контактные напряжения и деформации при механической обработке необходимо моделировать процесс при коэффициентах трения $0,06 \div 0,09$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Киричек А. В., Звягина Е. А. Исследование влияния эпиламирования на повышение стойкости осевого инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 1 (25). С. 30–35.

2. Киричек А. В., Селеменов М. Ф. Нанопленки эпиламов как средство повышения эффективности технологической механической обработки и периода стойкости инструмента // Нанотехнологии. 2012. № 5 (11). С. 7–14.

3. Киричек А. В., Селеменов М. Ф., Селеменова О. В. Влияние эпиламов (ПАВ) на физико-технические свойства инструментов при низкоскоростной механической обработке // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 2 (322). С. 85–96.

4. Vokhidov A. S. Epilam Multifunctional Nanosized Protective Films: Synergy Effect of Antiadhesive and Anti-Frictional Properties // International Journal of Nanotechnology. 2018. V. 15. N. 4–5. P. 417–421.

5. Водин Д. В. Применение нанопокровов для повышения стойкости режущего инструмента и основные методы их нанесения // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 67, 68.

6. Coatings to Improve Hole Production by Mandrels / M. F. Seleznev, S. A. Velichko, I. N. Kravchenko, et. al. // Russian Engineering Research. 2021. V. 41. N. 3. P. 269–271.

7. Кирейнов А. В., Есов В. В. Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 2 (62). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1591>

8. Худобин Л. В., Бабичев А. П., Бульжнев Е. М. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 543 с.

9. Моделирование технологических процессов нарезания и накатывания резьб в САЕ-системе (DEFORM-3D) / А. В. Киричек, М. Ф. Селеменов, К. Ф. Селеменов и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 5 (283). С. 35–38.

А. И. ДРОНОВ, канд. техн. наук (ОАО "Первоуральский новотрубный завод", г. Первоуральск),
В. С. ПАРШИН, д-р техн. наук, Н. В. СЕМЕНОВА, канд. техн. наук (ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина", г. Екатеринбург), e-mail: n.v.semenova@urfu.ru

Оценка эффективности инноваций работы волочильных станов

Рассматривается возможность повышения производительности волочильных станов. Предложен новый критерий оценки повышения производительности, полнее учитывающий интенсификацию процесса, который можно рекомендовать при выборе вариантов изготовления труб.

Ключевые слова: волочильный стан, эффективность, производительность, вытяжка, скорость волочения.

The possibility of increasing the productivity of drawing mills is being considered. A new criterion for evaluating the increase in productivity is proposed, taking more fully into account the intensification of the process, which can be recommended when choosing options for the manufacture of pipes.

Keywords: drawing mill, effectiveness, productivity, drawing, drawing speed.

Изготовление холоднодеформированных труб возможно с использованием нескольких альтернативных вариантов деформации, сочетающих способы холодной прокатки и волочения. Рациональный вариант изготовления выбирается на основании нескольких показателей, в том числе производительности процесса [1]. При этом эффективность работы волочильных станов оценивается их производительностью Π , которая в настоящее время рас-

считывается по числу метров изделия, протянутых за единицу времени, по формуле

$$\Pi = L/T_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где L — длина готового изделия; $T_{\text{ц}}$ — время цикла волочения.

Отметим, что наблюдается тенденция одновременного увеличения вытяжек за переход и скоростей волочения. В связи с этим необходимо иметь критерий оценки такого увеличения, для которого можно использовать выражение (1). Время $T_{\text{ц}}$ протягивания изделия длиной L определим по формуле [2]

$$T_{\text{ц}} = (1 + \xi) \frac{L}{v_{\text{в}}} + \Sigma t_n, \quad (2)$$

где ξ — время, необходимое на устранение обрывов и неполадок; Σt_n — суммарное время неперекрывающихся операций; $v_{\text{в}}$ — скорость волочения.

Учитывая, что длина $L = \mu L_{\text{н}}$ [3] готового изделия зависит от начальной длины $L_{\text{н}}$ и вытяжки μ , подставим равенство (2) в выражение (1) и получим для линейной производительности формулу

$$\Pi = \frac{L_{\text{н}} \mu}{(1 + \xi) \frac{L_{\text{н}} \mu}{v_{\text{в}}} + \Sigma t_n}. \quad (3)$$



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 79)

10. **Катышев С. И.** Применение программного комплекса "DEFORM-3D" для моделирования процесса фрезерования // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке. Новосибирск: Изд-во "Сибирская академическая книга", 2018. С. 14—22.

11. **Новиков А. Д., Тарапанов А. С., Селеменев М. Ф.** Определение изменения напряженного состояния и температуры в зоне формообразования резьбы раскатыванием // Совре-

менные материалы, техника и технологии. 2019. № 1 (22). С. 39—44.

12. **Особенности** моделирования процессов механической обработки в CAE-системах / И. В. Горбунов, И. В. Ефременков, В. Л. Леонтьев, А. Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (4). С. 846—853.

13. **Гисметулин А. Р., Горбунов И. В., Ефременков И. В.** Разработка препроцессора для моделирования операций механообработки и

CAE-системе LS-DYNA // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1338—1342.

14. **3D-моделирование** в CAD-системах на примере программы SolidWorks / Ю. И. Новоселова, А. М. Пауков, М. А. Шерышев и др. // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 6 (202). С. 120—122.

15. **Зиновьев Д. В.** Основы моделирования в SolidWorks / Под ред. М. И. Азанова. М.: ДМК Пресс, 2017. 240 с.

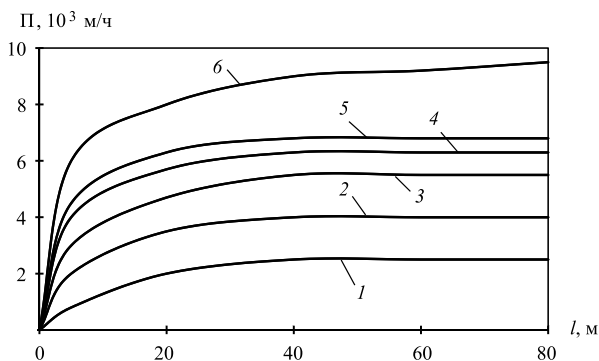


Рис. 1. Зависимости производительности Π стана от полезной длины l волочения с подвижной трубой при скорости волочения $v = 35$ (1), 45 (2), 55 (3), 65 (4), 75 (5) и 65 м/с (6) (волочение с подвижной волокой)

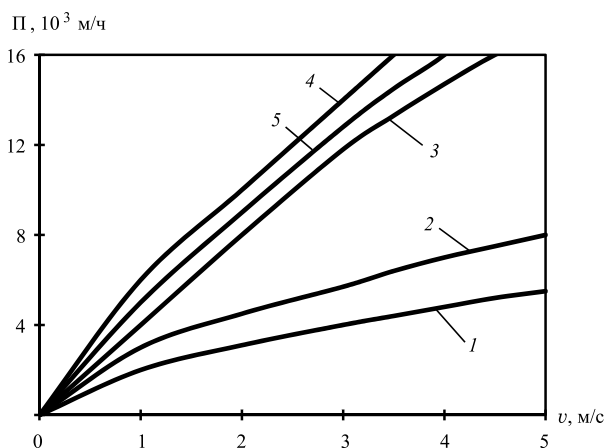


Рис. 2. Зависимости производительности Π стана от скорости v волочения с подвижной трубой при полезной длине волочения $l = 14$ (1), 18 (2), 30 (3), 100 (4) и 16 м (5) (волочение с подвижной волокой)

Проанализируем возможные пути повышения производительности волочильных станов для разработки ее обоснованного критерия оценки. Изучение конструкций и режимов работы существующих схем волочильных станов позволило установить наличие резервов повышения производительности. Действительно, линейная производительность стана возрастает с увеличением полезной длины волочения и уменьшением времени цикла волочения. В свою очередь, уменьшить время цикла волочения можно увеличением скорости волочения, сокращением времени на устранение обрывов труб и неполадок в работе и снижением суммарного времени непрерывающихся операций.

С увеличением полезной длины волочения увеличивается машинное время в цикле волочения и повышается производительность стана (рис. 1). Наибольшее повышение производительности наблюдается при длине волочения ≈ 30 мм, с увеличением длины волочения дальнейший ее рост уменьшается. Отмеченная тенденция сохраняется при изменении скорости волочения.

Эффективное повышение производительности волочильных станов невозможно без увеличения скорости волочения. Повышение производительности замедляется с увеличением скорости (рис. 2), так как при этом уменьшается машинное время в цикле волочения: чем меньше машинное время в оперативном времени, тем меньше повышение скорости волочения влияет на производительность.

Современные станы позволяют осуществлять волочение с большими скоростями, однако большие скорости рациональны лишь при волочении изделий большой длины. В противном случае большее ускорение на переходных процессах вызовет рост динамических нагрузок в приводе стана.

Одним из основных условий целесообразности повышения скорости волочения является перекрытие времени на вспомогательные операции (подача заготовок из бункера на раскатный стол, транспортирование по длине стола, раскладывание по ниткам, подравнивание заготовок и т. д.) временем на выполнение операций, связанных непосредственно с волочением. Это возможно только при наличии высоконадежных устройств, позволяющих максимально сократить цикл на стане. Поэтому одним из путей повышения производительности волочильных станов является механизация всех операций и автоматизация большинства из них. Для этого разрабатываются конструкции приемно-разборочных устройств, содержащих бункер переменной емкости, раскатные столы, поштучные дозаторы заготовок, механизмы передачи труб на оси волочения и др.

При возможности сокращения времени на вспомогательные операции рационально использовать повышение скорости возврата тележки. Так, на стане усилием 270 кН достигнута скорость волочения 168 м/мин, а скорость возврата тележки — до 300 м/мин.

Уменьшение времени на устранение обрывов труб и неполадок в работе стана, рациональная организация работы и рабочего места оператора также могут привести к значительному повышению производительности стана. Время на выполнение этих операций можно уменьшить за счет хорошей подготовки поверхностей труб к волочению, тщательной настройки механизмов стана и инструмента, применения качественного смазочного материала и совершенствования способов его подачи, качественной забивки головок труб перед волочением и др.

Однако внедрение более жестких вариантов волочения в некоторых случаях приводит к значительным простоям станом из-за обрыва труб или поломок оправок. Необходимо также сократить время на подачу и уборку пакетов труб со стана, замену технологического инструмента и подготовку стана к работе.

Производительность стана можно также повысить увеличением числа ниток волочения. Некоторые станы имеют пять—семь и более ниток. Увеличение числа ниток волочения не приводит к пропорциональному повышению производительности стана вследствие увеличения длительности пауз (например, для загрузки или удаления большего числа труб) и простоев стана из-за больших потерь на устранение обрывов труб. При этом увеличение числа ниток целесообразно лишь при высокой надежности операции волочения, зависящей как от конструктивных, так и технологических факторов.

Отметим еще одно направление повышения производительности волочильного оборудования — сокращение удельного веса вспомогательных операций в цикле волочения. Если увеличение полезной длины волочения невозможно из-за трудности транспортировки длинномерных труб или в связи с непригодностью оборудования по подготовке заготовок к волочению (травильные ванны, печи и т. д.), а увеличение скорости ограничено длиной волочения и ростом динамических нагрузок в узлах привода, основным резервом повышения производительности является сокращение времени вспомогательных операций. Возврат волочильной тележки в исходное положение, подготовка стана к работе до начала следующего цикла волочения и сокращение времени на разгон и остановку главной линии стана приближают машинное время к общему времени цикла работы. Это важное условие повышения производительности волочильных станов можно выполнить при использовании станов полунепрерывного и непрерывного типа [4].

С учетом сказанного и выражения (3) оценим эффективность интенсификации процессов волочения, введя показатель

$$\Theta = \Pi_1/\Pi_2, \quad (4)$$

где Π_1 и Π_2 — производительности нового и базового (сравниваемого) вариантов процесса.

С учетом выражения (3) равенство (4) примет вид:

$$\Theta = \frac{\mu_1 L_{H_1} \left[(1 + \xi_2) \frac{L_{H_2} \mu_2}{v_{B_2}} + \sum t_{n_2} \right]}{\mu_2 L_{H_2} \left[(1 + \xi_1) \frac{L_{H_1} \mu_1}{v_{B_1}} + \sum t_{n_1} \right]}. \quad (5)$$

В формуле (5) увеличение вытяжки отражено только повышением машинного времени в общем цикле волочения вследствие увеличения длины готового изделия. Используя циклограммы эксплуатируемых в настоящее время волочильных станов [5] и формулу (5), оценим эффективность увеличения вытяжек на линейном волочильном стане.

В первом случае подставим: $\xi_1 = \xi_2 = 0,4$; $\sum t_{n_1} = \sum t_{n_2} = 14$ с; $v_{B_1} = v_{B_2} = 1$ м/с; $L_{H_1} = L_{H_2} = 16$ м; $\mu_1 = 1,96$; $\mu_2 = 1,4$, получим $\Theta_1 = 1,09$.

Во втором случае подставим: $\xi_1 = \xi_2 = 0,2$; $\sum t_{n_1} = \sum t_{n_2} = 10$ с; $v_{B_1} = v_{B_2} = 1$ м/с; $L_{H_1} = L_{H_2} = 6$ м; $\mu_1 = 2,25$; $\mu_2 = 1,5$, получим $\Theta_2 = 1,19$.

Таким образом, в первом случае вытяжка увеличивается на 40 %, во втором — на 50 %, производительность повышается соответственно на 9 и 19 %.

Вместе с тем, чем больше вытяжка на волочильном стане при холодной деформации, тем меньше времени затрачивается на изготовление изделия заданного сечения из заготовки. Кроме того, увеличение вытяжки дает значительный эффект в целом по холодному переделу, так как позволяет снизить себестоимость продукции в результате уменьшения числа производственных переходов и, следовательно, уменьшения числа вспомогательных операций. Это значит, что хотя формула (1) для определения производительности волочильного стана используется в расчетах, она недостаточно точно отражает тенденции роста при сравнении двух вариантов. Тогда для оценки эффективности интенсификации процессов волочения следует ввести показатель, наиболее полно отражающий суть процесса протягивания изделия на волочильном стане и его пластической деформации.

Для более полной оценки повышения производительности волочения и получения обобщенного критерия используем понятие смещенного объема, известного из прокатки [6]. Производительность волочильного стана оценим объемом металла, смещенного при волочении за единицу времени. Тогда производительность определим по формуле

$$\Pi = \frac{F_H - F_K}{T_{ц}} L = \frac{\mu - 1}{T} F_H L_H, \quad (6)$$

где F_H и F_K — начальная и конечная площади поперечного сечения заготовки и изделия.

Выражение (6) отличается от выражения (3) тем, что оно учитывает как удлинение готового изделия при увеличении вытяжки и вследствие этого машинного времени в общем цикле волочения, так и увеличение вытяжки при волочении.

Используя формулу (6), составим аналогично предыдущему выражение для показателя эффективности интенсификации:

$$\Theta = \frac{(\mu_1 - 1) F_{H_1} L_{H_1} \left[(1 + \xi_2) \frac{L_{H_2} \mu_2}{v_{B_2}} + \sum t_{n_2} \right]}{(\mu_2 - 1) F_{H_2} L_{H_2} \left[(1 + \xi_1) \frac{L_{H_1} \mu_1}{v_{B_1}} + \sum t_{n_1} \right]}. \quad (7)$$

Из равенства (7) можно получить формулы для расчета эффективности при увеличении вытяжки и скорости волочения.

В первом случае, полагая увеличение вытяжки по формуле $\mu_1 = n\mu_2$, получим выражение

$$\Theta_{\mu} = \frac{(n\mu_1 - 1)F_{H_1}L_{H_1}v_{B_1}[(1 + \xi_2)L_{H_2}\mu_2 + v_{B_2}\sum t_{n_2}]}{(\mu_2 - 1)F_{H_2}L_{H_2}v_{B_2}[(1 + \xi_1)L_{H_1}n\mu_1 + v_{B_1}\sum t_{n_1}]} \quad (8)$$

Во втором случае, подставив в равенство (7) увеличение скорости по формуле $v_{B_1} = nv_{B_2}$, получим формулу

$$\Theta_v = n \frac{(\mu_1 - 1)F_{H_1}L_{H_1}[(1 + \xi_2)L_{H_2}\mu_2 + v_{B_2}\sum t_{n_2}]}{(\mu_2 - 1)F_{H_2}L_{H_2}[(1 + \xi_1)L_{H_1}\mu_1 + nv_{B_1}\sum t_{n_1}]} \quad (9)$$

Используя выражение (8), числовые данные для первого случая и полагая $F_{H_1} = F_{H_2}$, получим критерий эффективности $\Theta_{\mu_1} = 1,88$, при числовых данных для второго случая получим $\Theta_{\mu_2} = 2,04$. Та-

ким образом, второй критерий точнее первого отражает тенденцию повышения производительности волочильных станов. Из формулы (9) для числовых данных первого примера получим $\Theta_{v_1} = 1,49$ при $n = 2$, что также полно отражает суть процесса волочения.

Таким образом, критерий (7), весьма достоверно учитывающий основные факторы, можно рекомендовать для оценки повышения производительности в системе автоматизированного выбора рационального варианта изготовления холоднодеформированных труб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Паршин В. С., Фотов А. А., Алешин В. А.** Холодное волочение труб. М.: Металлургия, 1979. 240 с.
2. **Перцов З. И.** Волочильные станы. М.: Металлургия, 1986. 208 с.
3. **Перлин И. А., Ерманок М. З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
4. **Паршин В. С.** Эффективность использования волочильных станов // Известия вузов. Черная металлургия. 1976. № 12. С. 69—71.
5. **Калибровочные** и трубоволочильные станы. Каталог-справочник. М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1971. 240 с.
6. **Целиков А. И., Гришков А. И.** Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. 358 с.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5—2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1—3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).

С. В. ОБОРИН, Т. Ю. ГУБИНА (ПАО "НПО Искра", г. Пермь),
e-mail: osv720@iskra.perm.ru

Контейнеры из композиционных материалов для транспортирования и хранения авиационных двигателей

Приведены описание и основные конструктивные составляющие проектной конструкции контейнера из композиционных материалов. Представлены два варианта рамы контейнера — с каркасом из композита и из металла. Описано использование системы наддува корпуса инертным газом. Обоснован выбор материалов конструкции контейнера, рассмотрены особенности и свойства разработанной модели.

Ключевые слова: контейнер, композиционные материалы, транспортировка, хранение, конструкция.

The description and the main structural components of the design construction of the container made of composite materials are given. There are two options for the container frame — with a composite frame and a metal frame. The use of an inert gas pressurization system of a body is described. The selection of materials for the construction of the container is substantiated, the features and properties of the developed model are considered.

Keywords: container, composite materials, transportation, storage, construction.

В настоящее время для транспортировки и хранения авиационных двигателей отечественных производителей используются контейнеры, изготовленные из дерева или различных металлических сплавов. Поэтому с целью повышения технологичности изготовления и для улучшения эксплуатационных характеристик контейнера возможно применение контейнеров из композиционных материалов.

Использование композиционных материалов получило широкое распространение как в России, так и за рубежом, и имеет положительную динамику роста. Эти материалы имеют бесспорные преимущества перед металлическими — отсутствие коррозионных явлений, небольшая масса, стойкость к воздействию

агрессивных веществ, долговечность, простота монтажа и т. п. [1]. В машиностроении композиционные материалы все чаще ис-

пользуются как альтернатива металлу [2]. В данной статье рассмотрена возможность создания контейнеров из композиционных материалов.

Цель работы — проектная разработка конструкции контейнера из композиционных материалов и с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Контейнер предназначен для транспортировки и хранения особо ответственных грузов, например авиационных двигателей, в условиях агрессивной морской среды.

Конструкция контейнера

Контейнер (рис. 1) состоит из корпуса 1, рамы 2 и системы 3 наддува корпуса инертным газом (азот).

Корпус контейнера. В качестве основного материала при разработке корпуса контейнера выбран стеклопластик, что обусловлено следующими его свойствами:

- высокая удельная прочность;
- высокая коррозионная стойкость;

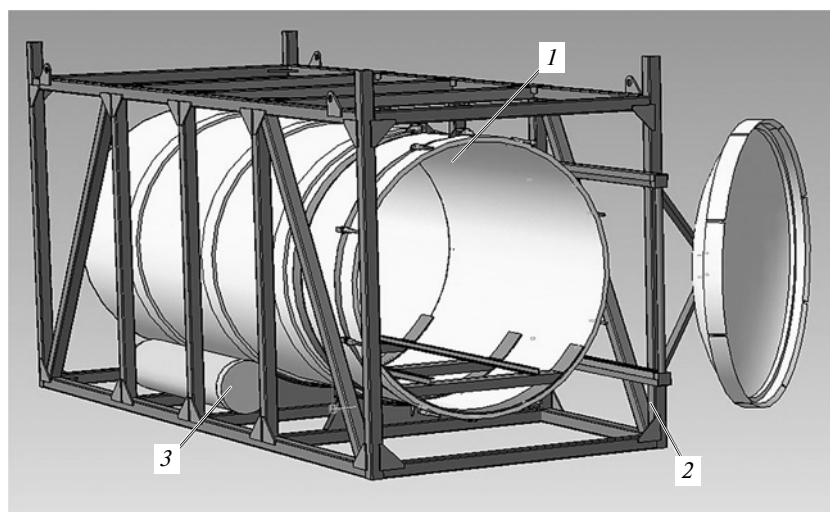


Рис. 1. Общий вид контейнера

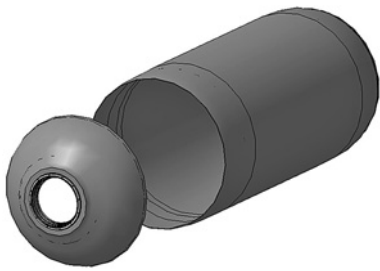


Рис. 2. Вид корпуса с отделенным передним дном

увеличенный срок службы (по различным данным — 25 лет и более).

Кроме того, применение стеклопластика обеспечивает:

возможность формирования трубных конструкций с заданными характеристиками за счет анизотропии его свойств;

малую массу изделий, что позволяет при погрузочно-разгрузочных работах и монтаже обходиться облегченным комплексом подъемно-транспортных машин;

низкую трудоемкость изготовления [3].

Стеклопластиковый корпус представляет собой двухслойную конструкцию, состоящую из защитного и конструкционного (силовая оболочка) слоев. Защитный слой выполнен из полиэтилена и предназначен для повышения химической стойкости корпуса и сохранения его герметичности при действии значительных внешних нагрузок. Конструкционный слой выполнен из стеклопластика, получаемого методом "мокрой" намотки стеклянных нитей (ровингов), пропитанных эпоксидным связующим. Конструкционный слой обеспечивает заданное соотношение физико-механических характеристик вдоль оси корпуса и в окружном направлении. Конструкционный слой наносится поверх защитного и заготовка корпуса проходит режим термообработки (полимеризации), в процессе которого оба слоя "сшиваются" друг с другом, образуя монолитную конструкцию.

Намотка силовой оболочки корпуса осуществляется по схеме

типа "кокон", при этом перед намоткой в зоне дна располагаются фланцы. После намотки формообразующая оправка извлекается, переднее дно обрезается, а заднее дно остается одним целым с цилиндрической частью (рис. 2). К фланцам с помощью болтов прикручиваются металлические основания.

На наружной поверхности силовой оболочки выполнено три кольцевых стеклопластиковых шпангоута, предназначенных для закрепления корпуса в раме.

Передняя крышка (отрезанное переднее дно) крепится к корпусу шарнирным механизмом, дающим возможность открывать и закрывать крышки, обеспечивая беспрепятственную работу по закатке/выкатке изделия из контейнера. Герметичность корпуса и передней крышки обеспечивается уплотнением.

Передняя крышка 2 (рис. 3) крепится к корпусу 1 с помощью накладных шпилек 5, приваренных к хомутам 6, которые укреплены на цилиндрической части корпуса. Движение направляющих 4 происходит благодаря роликам 7, которые также приварены к хомутам. Направляющие 4 соединены вращающимся стержнем 8, к которому приварены две балки 9, необходимые для того,

чтобы прикрепить крышку к данному шарнирному механизму.

В задней части корпуса в зоне горловины предусмотрены отверстия для двух идентичных кранов, которые предназначены: первый — для откачки воздуха, создания вакуума и закачки инертного газа во внутреннюю полость; второй — для установки мановакуумметра, предназначенного для контроля процесса откачки и закачки инертного газа.

Во внутренней полости корпуса 1 (рис. 4) расположены две направляющие балки 2, играющие роль рельсов, служащих опорой при закатке и выкатке изделия. Рельсы выполнены из металла и их основание 3 заформовано непосредственно в корпус. В передней части полости корпуса имеется упор, ограничивающий передвижение рамы с изделием внутри корпуса после закатки. В задней части корпуса имеется стопорное устройство для фиксации рамы с изделием после завершения процесса закатывания.

Для того чтобы поместить изделие в корпус, необходимо установить его на специальном ложементе рамы крепления изделия, состоящем из металлического каркаса. Далее изделие с помощью транспортной тележки закатывается внутрь. Рама с изде-

(деталь 4 не показана)

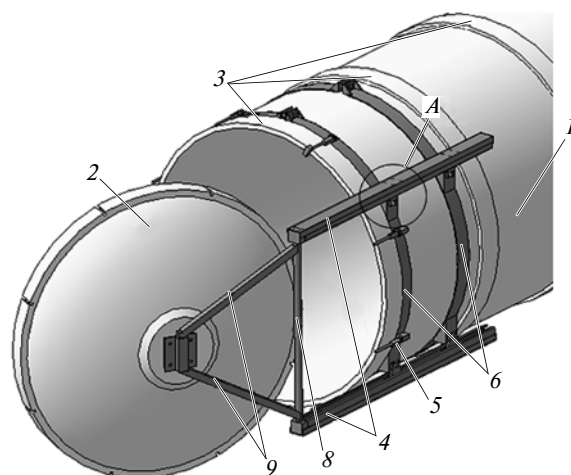
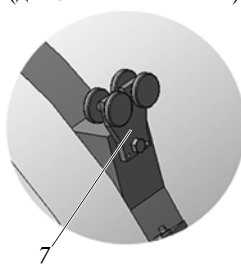


Рис. 3. Элементы крепления крышки к корпусу:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — шпангоут; 4 — направляющая балка (2 шт.); 5 — накладная шпилька (8 шт.); 6 — хомут (2 шт.); 7 — ролик (4 шт.); 8 — направляющий стержень; 9 — балка (2 шт.)

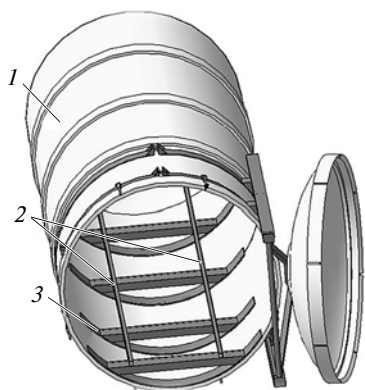


Рис. 4. Внутренняя рама корпуса

лием закрепляется в корпусе, фиксирующим устройством.

Рама 2 контейнера (см. рис. 1) служит для размещения в ней основного оборудования, обеспечения условий транспортирования и штабелирования. Раму можно изготовить как в виде сварной металлической конструкции, так и из композиционного материала. Во втором случае для соединения между собой балок рамы необходимо при их изготовлении предусмотреть закладные элементы. Рама из композиционного материала является альтернативой металлическому каркасу и позволит существенно уменьшить массу всей конструкции в целом. При этом рама спроектирована таким образом, что существует возможность штабелирования рам.

Система наддува корпуса инертным газом (азотом) предназначена для поддержания перепада давления с внешней средой и создания условий длительного хранения.



Рис. 5. Система наддува корпуса инертным газом

Система наддува (рис. 5) состоит из баллона 1, заправленного азотом, и трубопроводной обвязки 2 (в том числе кранов, датчиков, клапанов).

Длительность нахождения контейнера в режиме "Хранение" с подкачкой инертного газа от автономного баллона уточняется по результатам изготовления опытного образца.

В районе задней крышки корпуса контейнера имеются датчики влажности и температуры с выводом разъемов через заднюю крышку для фиксирования и контроля температурно-влажностного режима во внутренней полости корпуса.

Для компенсации утечки инертного газа из внутренней полости корпуса при хранении необходимо обеспечить подкачку газа в автоматическом режиме. Подкачка осуществляется из баллона со сжатым газом (азотом), расположенного на раме, через кран для закачки во внутреннюю полость.

Сравнительный анализ разработанного контейнера с контейнерами, используемыми в настоящее время

На данный момент контейнеры для транспортировки и хранения авиационных двигателей изготавливаются из металлических сплавов и представляют собой "ящички" сварной конструкции.

Преимущества контейнера, представленного в данной работе,

относительно металлических контейнеров состоят в следующем:

1) высокая стойкость к воздействию внешних агрессивных сред (в том числе устойчивость к морской среде) позволяет транспортировать и хранить изделия в контейнере в инертной среде в различных климатических условиях без принятия дополнительных мер для консервации;

2) высокая удельная прочность и относительно низкая плотность композиционных материалов по сравнению с металлом позволяют снизить массу контейнера;

3) создание внутри корпуса герметичного объема и использование азота в качестве среды позволяют значительно увеличить срок консервации (переконсервации) изделия.

Недостатком данного контейнера в сравнении с металлическим является сложность его конструктивного исполнения, возникшая в результате необходимости применения металлических элементов крепления (например, для соединения крышки с корпусом). Вследствие этого для изготовления потребуются большая номенклатура оборудования.

Заключение

В результате проделанной работы был спроектирован контейнер для транспортировки и хранения авиационных двигателей, корпус которого выполнен из композиционного материала. Использование композиционного материала в конструкции контейнера позволило существенно улучшить его эксплуатационные характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Лахтин Ю. Н., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для втузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 80 с.
2. Тялина Л. Н., Минаев А. М., Пручкин В. А. Новые композиционные материалы: уч. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2011. 528 с.
3. URL: http://www.pck74.ru/o_stekloplastike.