ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

9
2007

Орган информации

МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭНЕРГЕТИКИ РФ

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Алексейчук Г.П., Алешин Н.П., Братухин А.Г., Воронцов А.Л., Гусейнов А.Г., Дмитриев А.М. (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.**, **Древаль А.Е.** (председатель секции технологии машиностроения), **Дроздов Ю.Н.** (председатель секции конструирования и расчета машин), **Кутин А.А., Логунов А.В., Омельченко И.Н.** (председатель секции организации и экономики производства), **Пименов А.Ф., Попов Д.Н., Салтыков М.А., Трегубов Г.П., Цыганкова И.А.** (ответственный секретарь)

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)

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО «Издательство "Машиностроение"» 107076, Москва, Стромынский пер., 4

Адрес редакции:

129626, Москва, проспект Мира, д. 106, а/я 78.
Телефоны: (495) 687-63-37, (495) 682-77-11
E-mail: vestmash@mashin.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за № 77-12421 в Комитете Российской Федерации по печати
Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),
27841 ("Пресса России"),
60264 ("Почта России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Подольская периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Яковлев В. В. — Конструктивная прочность изделий в свете теорий устойчивости процесса деформирования и пластичности . . . 3
Кулиш Е. В., Турыгин Ю. В. — Методика расчета прессовых полисоединений . . . 9
Бирюков В. И. — Методика расчета амплитуды и частоты автоколебаний в камере ЖРД с термическим разложением гидразина . . . 12
Мамедов А. Ф. — Кинематический анализ движения ведомого цилиндрического зубчатого колеса с прямыми зубьями . . . 15
Александров И. К. — Энергетический КПД машины с частичной рекуперацией энергии . . . 17

Цикл статей
"Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки"

Колесников В. И., Сычев А. П., Сергиенко В. П., Купреев А. В. — Тепловые эффекты и структурные изменения материалов в маслоохлаждаемых фрикционных парах трения . . . 19

Металлургическое оборудование и прокатное производство

Поляков Б. Н. — Напряженно-деформированные состояния и оптимальные конструктивные параметры станин заготовочных и листовых прокатных станов . . . 23

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Кутин А. А., Пирогов В. В. — Методы обеспечения требуемой точности обработки сложных деталей с учетом технологических особенностей многокоординатного фрезерования . . . 29
Бахарев В. П., Куликов М. Ю., Верещака А. С. — Регулирование микродоводочных процессов финишной обработки минералокерамики путем применения эффективных СОТС . . . 35
Еренков О. Ю. — Химико-механический подход к обработке полимерных материалов резанием . . . 40
Кабалдин Ю. Г., Биленко С. В., Муравьев С. Н. — Информационная модель самоуправляемого синтеза наноматериалов . . . 43
Коротаев Д. Н. — Выбор оптимального способа упрочнения прецизионных поверхностей трения . . . 50
Латышев В. Н., Наумов А. Г., Раднюк В. С., Подгорков В. В. — К вопросу о проникновении СОТС на контактные площадки при резании металлов . . . 53

Обработка материалов без снятия стружки

Воронцов А. Л. — Новая теория осадки цилиндрической заготовки . . . 55

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. — Метод эволюционного синтеза сложных технических объектов с использованием экспертных знаний . . . 65
Омельченко И. Н., Лазаренко А. Г. — Графоаналитическое решение логистической задачи о максимальном сетевом потоке минимальной стоимости . . . 71
Меньщиков В. В., Козлов Г. В., Ерошин С. Е. — Метод построения рейтинговой системы оценок эффективной деятельности . . . 73

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л., Обакшин П. А., Змызгова Т. Р. — Особенности фильтрации цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа для оценки поврежденности деталей и конструкции машин . . . 77
Иванов А. Н. — Выставка "Мир инструмента-2007" . . . 78
Иванов А. Н. — Выставка "Интерлакокраска-2007" . . . 81

История науки и техники

Шелест П. А. — От паровой машины Д. Уатта до газовой турбины А. Н. Шелеста . . . 83
Потапова Г. С. — Обозрение зарубежных изданий . . . 93
Реклама . . . 52, 64
Вниманию читателей . . . 76

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Yakovlev V. V. — Product mechanical strength from the standpoint of the stability theory of the deformation and ductility process
Koulish Ye.V., Turyguin Yu.V. — Press poly-joints design procedure
Biryukov V. I. — Calculation technique of the amplitude of self-oscillations and vibration frequency in the liquid-fuel rocket engine chamber with hydrazine thermal decomposition
Mamedov A. F. — Kinematic analysis of the driven spur gear
Alexandrov I. K. — Energy efficiency of a machine with energy partial recuperation

Series of articles
"Problems of tribology — friction, wearing away and lubrication"

Kolesnikov V. I., Sychiov A. P., Serguienko V. P., Koupreev A. V. — Maerials thermal effects and structural changes in oil-cooled frictional pairs

Metallurgical equipment and rolling

Polyakov B. N. — Deflected mode and optimal and design factor of the billet and sheet mills stands

MANUFACTURING TECHNOLOGY

Kutin A. A., Pirogov V. V. — Assurance of the working accuracy requirement for complex components considering multicoordinate milling process features
Bakharev V. P., Koulikov M. Yu., Vereschaka A. S. — Ccontrol of the operational microdeveloping processes at ceramic mineral final polishing by applying effective cooling lubricants
Yerenkov O. Yu. — Chemical-mechanical approach to cutting polymeric materials
Kabaldin Yu.G., Bilenko S. V., Mouraviov S. N. — Information models of nano-materials self-controlled synthesis
Korotayev D. N. — Precision rubbing surface optimal strengthening deciion
Latyshev V. N., Naumov A. G., Radnyuk V. S., Podgorkov V. V. — On the problem of the cooling lubricants penetration onto contact areas at metal cutting

Chipless materials working

Vorontsov A. L. — New theory of the cylindrical blanks upsetting

PRODUCTION ORGANIZATION AND ECONOMICS

Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. — Evolutionary synthesis procedure of complex technical objects by using expertise
Omelchenko I. N., Lazarenko A. G. — Graphic-analytical logistic task solution on maximal network flow of minimum value
Menschikov V. V., Kozlov G. V., Yeroshin S. Ye. — Method of building effectiveness rating system

TECHNICAL INFORMATION

Syzrantsev V. N., Golofast S. L., Obakshin P. A., Zmyzgova T. R. — Characteristic properties of digital image filtering of the strain integral gauge response to estimate failure rate of components and machine hardware
Ivanov A. N. — "ISET (Tool World)'2007" exhibition
Ivanov A. N. — The "Interlakokraska'2007" exhibition

History of science and engineering

Shelest P. A. — From D. Watt's steam-engine to A. N. Shelest's gas turbine
Potapova G. S. — Review of foreign journals

Художественный редактор *Т. Н. Галицына*
Технический редактор *О. А. Ефремова*
Корректор *М. Г. Джавадян*

Сдано в набор 02.07.2007. Подписано в печать 16.08.2007.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,76. Уч.-изд. л. 14,59. Заказ 122.

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.

© ОАО "Издательство "Машиностроение", "Вестник машиностроения", 2007

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 539.3

В. В. ЯКОВЛЕВ, канд. техн. наук (Алтайский ГТУ, г. Барнаул)

Конструктивная прочность изделий в свете теорий устойчивости процесса деформирования и пластичности

Рассматриваются вопросы конструктивной прочности изделий с точки зрения внутренних процессов, происходящих при деформировании механической системы, в теории устойчивости процесса деформирования и теории пластичности.

Product mechanical strength is considered from the standpoint of the internal processes, which take place at deforming a mechanical system, in the stability theory of deformation and theory of plasticity.

При конструировании тех или иных объектов одним из основных вопросов является конструктивная прочность изделия. При этом до сих пор не дано однозначного определения такому понятию, как "конструктивная прочность".

Основная идея настоящей статьи заключается в том, что наблюдаемые отказы механических систем в большинстве своем не являются следствием потери устойчивости состояния, а есть результат потери устойчивости процесса деформирования (в противоположность случаю упругости).

Поскольку процесс деформирования — это движение материальных частиц, то устойчивость понимается здесь как устойчивость движения, а точнее, как устойчивость бесконечно медленного движения.

Обоснование данной идеи и ее реализация методами, которые представляются наиболее подходящими для повышения ресурса машин и остаточной пригодности деталей, и являются главными задачами этой работы.

Среди многочисленных разноплановых исследований, согласно которым одной из причин выработки ресурса конструкции считается рост трещин, наибольший интерес представляют работы, связанные с определением остаточной пригодности деталей, в основе которых лежат природа и механизм взаимодействия дефектов, определяющих реальную прочность материалов [1]. Эта проблема имеет два аспекта. С одной стороны, идеальная прочность при сдвиге определяется уровнем напряжения, выше которого деформация совершенного кристалла (кристалла, в котором все дефекты заблокированы) перестает быть упругой, при этом кристаллическая структура становится механически нестабильной. С другой стороны, реальные металлы всегда содержат начальные трещинообразные дефекты, которые неизбежны даже при самых совершенных технологиях и высоких требованиях к контролю качества. Следовательно, прочность реальных материалов представляет собой некоторые приближения к идеальному случаю.

В последнее время развивается новая дисциплина — механика поврежденной сплошной среды [2], сущность которой состоит в следующем.

Предполагается, что влияние распределенных в теле микрополостей (микроповреждений) на степень ухудшения свойств материала можно описать соответствующими параметрами, определяющими так называемое "поле повреждений". Они характеризуют внутреннее состояние материала, поэтому решение задачи сводится к исследованию различных моделей среды с распределенными в ней микроповреждениями, что и позволяет определить прочностные характеристики материала.

Однако пригодность материала для конкретной конструкции должна оцениваться с учетом пока еще не сформулированных характеристик сверх тех, которые получены в результате испытания образца, т. е., как пишет В. И. Феодосьев [3], "... научные основы конструктивной прочности до сих пор не созданы", и при подборе материала приходится пользоваться в первую очередь наработками, накопленными за многолетнюю практику.

Что же можно предложить в данном случае? Обратимся к работам [3, 4], в которых рассматриваются вопросы взаимного влияния внешних нагрузок и перемещений, т. е. считается, что не только перемещения зависят от нагрузки, но и сами нагрузки меняются в зависимости от перемещений. Таким образом, нагрузки небезразличны к изменениям формы или положениям системы и как бы "следят" за этими изменениями. Это весьма важное для механики твердого деформируемого тела положение остается незамеченным. В связи с этим рассмотрим процессы, происходящие в твердом теле, с учетом механизмов микроструктурных изменений материала.

В работе [2] отмечено, что влияние поврежденности материала проявляется главным образом в уменьшении истинной площади поперечного сечения, что обусловлено пространственным распределением микродефектов. Благодаря этому уменьшению площади влияние напряжения Коши σ, действующего на тело, увеличивается, вследствие чего деформация поврежденного материала зависит уже не только от уменьшения площади поперечного сечения, обусловленного образованием микрополостей, но и от их пространственного распределения в объеме тела.

Здесь модель изучаемого явления — накопление повреждений под действием непропорционального нагружения анизотропной среды, задана. Наша задача заключается в том, чтобы логически обосновать требования, с помощью которых можно дать оценку этой модели с точки зрения конструктивной прочности.

Задача общего характера заключается в том, что необходимо выяснить, как проявляется связь между напряжениями и деформацией тела (конструктивного элемента) при различных видах его нагружения.

Ограничимся рассмотрением случая, когда действующие на тело внешние T_i и внутренние F_i силы, а также задаваемые перемещения U_i медленно меняются со временем и в любой момент могут быть зафиксированы. Кроме того, будем считать, что направление действия внешних сил не зависит от изменения формы тела вследствие его деформирования. Тогда изменению параметров T_i, F_i, U_i в каждой точке тела будут соответствовать изменения процессов нагружения и деформирования (внутренние процессы) элементарного объема, т. е. изменения во времени напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij}.

Напряженное состояние материала и происходящие в нем внутренние процессы удобно представить в девятимерном (в соответствии с числом компонентов тензоров) декартовом пространстве. Тогда по осям откладывают одноиндексные компоненты соответствующих тензоров (σ_{xx} и e_{xx}, σ_{yz} и e_{yz} и т. д.). В таком пространстве каждому напряженному состоянию элементарного объема соответствует вектор σ напряжений, а деформации — вектор e деформации. Внутренние процессы представляются зависимостями траекторий нагружения и траекторий деформирования, которые описываются координатами начала и конца соответствующих векторов (рис. 1). В этом случае нас интересует уже не модель изучаемого явления, а сам процесс поиска той области пространства переменных параметров среды, где имеет место оптимальный процесс.

Как известно [5], для упрочняющейся упругопластической среды общими свойствами являются:

взаимно однозначное соответствие траектории нагружения и деформирования;

независимость этого соответствия от скорости процесса;

существенная зависимость от направления процесса.

Если два первых свойства повторяют свойства упругости, то третье является принципиально новым и вытекает уже из того экспериментально полученного факта, что процесс деформирования упругопластического тела из любого состояния можно сделать обратимым. Так, если к данному состоянию элементарного объема

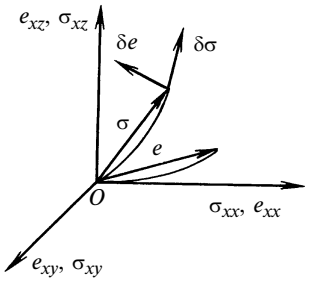


Рис. 1. Образ нагружения тела в пространстве напряжений

добавить небольшую нагрузку (приращение $\delta\sigma$ напряжения, см. рис. 1), то всегда найдутся такие ее направления, при которых соответствующие приращения δe деформации будут связаны с $\delta\sigma$ линейным законом упругопассивного деформирования:

$$\delta\sigma_{ij} = E_{ijmn}\delta e_{mn}, \qquad (1)$$

где E_{ijmn} — тензор упругих постоянных.

При других направлениях догрузки могут возникать необратимые пластические деформации, и тогда должна выполняться некоторая, отличная от выражения (1), зависимость $\delta\sigma_{ij} \sim \delta e_{mn}$, определяющая закон активного деформирования. При простейшей и широко распространенной идеализации эта зависимость тоже линейна:

$$\delta\sigma_{ij} = E'_{ijmn}\delta e_{mn}. \qquad (2)$$

В связи с этим соответствующие теории пластичности называются дифференциально-линейными, но при этом тензор E'_{ijmn} в выражении (2) зависит от состояния и истории процесса деформирования и не совпадает с E_{ijmn}.

Такое представление о природе пластичности возможно (и в большинстве случаев оправдано) только относительно стержневых систем, для которых закон пластичности максимально прост: активный процесс (нагрузка) отличается от пассивного процесса (разгрузка) только тем, что в последнем случае связь между напряжением и деформацией становится нелинейной.

В более сложных системах, например таких, как пластины, оболочка и т. п. даже при одномерном внешнем нагружении (например одноосном сжатии прямоугольной пластины) представление о пластичности как об одномерном явлении недопустимо [6]. Здесь изменение деформирования в момент выпучивания уже не сводится к простому возврату, а приводит к излому траектории деформирования под неизвестным углом. Для описания процесса выпучивания требуются соответствующие соотношения, описывающие процесс сложного деформирования (нагружения), включающие в себя определение точек излома [7].

Вместе с тем процессы, происходящие в материале, нельзя описать одним аналитическим выражением. Такая специфика дополняется еще и тем, что кривая одноосного испытания образца аппроксимируется неаналитической функцией. Это приводит к тому, что при решении краевых задач приходится различать области, в которых действуют разные законы взаимосвязи напряжения и деформации, границы которых заранее не известны. В некоторых случаях трудности, связанные с определением этих границ, оправдываются простотой соотношений в пластических областях (теория идеальной пластичности, случай пропорционального нагружения). Если же материал нельзя определить как идеально пластический, а путь деформирования ничем заранее не ограничен, то трудности, возникающие при решении математических задач, основанных на неаналитических теориях, практически непреодолимы. Вместе с тем эти случаи являются настолько специфическими, что нет необходимости в проведении анализа более тонкого, чем тот, который используется в подавляющем большинстве случаев.

Поэтому возникает желание использовать при решении таких задач теорию, которая, с одной стороны, дос-

таточно хорошо отражала бы механические свойства материала, а с другой — описывала любой процесс деформирования одним аналитическим выражением. Необходимым условием существования такого единого аналитического выражения является следующее требование: любое упругопластическое состояние должно иметь только одно направление упругой догрузки [8]. Специфика уравнений в этом случае такова, что учет изменения границы тела при постановке краевых условий является фактором второстепенным и при малых изменениях считается ненужным. Даже если придерживаться концепции поверхностного нагружения, то это требование означает, что для поверхности нагружения (деформирования) состояние, близкое к упругопластическому, описывается отрезком прямой. Если сделать предположение о невогнутости поверхности нагружения, то следует признать, что и вся поверхность нагружения является упругопластической. А чтобы иметь возможность описывать пластические деформации как остаточные, следует предположить, что поверхность нагружения проходит через начало координат пространства напряжений [9].

Отметим к тому же, что для вывода выражений, описывающих процесс пластичности в аналитической теории так же, как и в обычных теориях, можно исходить из некоторой системы предположений. Но с другой стороны, аналитическую теорию можно рассматривать как приближение к обычным неаналитическим теориям. Для каждой теории пластичности с множеством направлений упругих нагрузок можно сформулировать как угодно близкую аналитическую теорию. Однако не следует утверждать, что это и есть описание происходящего явления.

Итак, задача определения оптимального факторного описания процесса деформирования для конкретной ситуации не всегда может решаться легко. Поэтому нет необходимости опираться на теории упругости, пластичности, ползучести как основной принцип, характеризующий процесс. Эта методика определения, по существу, представляет собой инструмент анализа, а не средство определения физической сущности той или иной механической системы с точки зрения ее конструктивной прочности.

Таким образом, потерю устойчивости процесса деформирования с этих позиций, учитывая прежде всего работу [2], понимаем уже не как медленное движение континуума, а как медленное движение материальных частиц сплошной поврежденной среды. Поэтому необходимо найти характеристики механического поведения микроповреждений в зависимости от вида поверхностной деформации детали.

В общем случае потеря устойчивости механической системы состоит в появлении таких деформаций, как деформация выпучивания, которые в идеале не могут возникнуть без воздействия дополнительной системы возмущающих сил. Поэтому, естественно, в машиностроении привалирует точка зрения, что единственным критерием правильности того или иного подхода к устойчивости системы является расчет конструкций с учетом небольших начальных отклонений. Однако причины возникновения этих неправильностей, как правило, известны, и нет проблемы в обеспечении конструктивной прочности.

Другое дело, если система ведет себя так, что наряду с исходным невозмущенным состоянием есть равновесное возмущенное состояние. Тогда необходимо определить причину возмущающих сил. Для этого воспользуемся квазисистематическим анализом на том основании, что материал конструкции с распределенными микродефектами есть собственно упругопластическая среда, в которой эффект инерционности в возмущенном движении полностью исчезает на некотором отрезке времени, причем чем он меньше, тем меньше скорость начального возмущения. В последующей фазе возмущенное движение, так же как и невозмущенное, является квазистатистическим.

Отличаясь сравнительной простотой, квазистатистический анализ позволяет рассматривать непосредственную причину возмущений: воздействие на систему иных, чем в невозмущенном состоянии дополнительных сил. При обычном динамическом анализе этот вопрос никогда не поднимался то ли из-за опасения математических трудностей, а скорее всего в силу приверженности традиционной теории устойчивости систем с конечным числом степеней свободы. Для этих систем считается, что воздействие внешней нагрузки на каждую частицу делает оправданным задание произвольных мгновенных возмущений параметрами перемещений и их скоростями. Поэтому можно ставить вопрос о взаимовлиянии внешних сил и перемещений. Однако для системы, представляющей собой сложное деформируемое тело, такое задание параметров возмущения неестественно и может быть недостоверным, потому что каждый ее элемент не является свободно нагруженной системой.

Раскрывая причину изменения внутренних параметров и определяя в соответствии с этим их величину, постановку задачи о взаимовлиянии внешних сил и перемещений в рамках квазистатистического анализа можно сформулировать следующим образом.

Пусть тело медленно нагружается изменяемой системой внешних сил заданным способом (в результате чего было определено внутреннее равновесное невозмущенное движение) и пусть к телу прикладывается и снимается другая система малых внешних сил (возмущающие силы), создающая равновесное изменение внутреннего движения. Этот связанный режим внешнего и внутреннего движения частиц материала базируется на следующих положениях теории устойчивости:

явление упругопластического выпучивания не связано с потерей устойчивости состояния равновесия (в отличие от упругих тел), а является следствием потери устойчивости движения частиц тела в процессе деформирования;

выпучивание как процесс даже в простейших упругопластических конструкциях сопровождается разгрузкой;

при фиксированных силах основного состояния равновесный переход в возмущенное состояние возможен только с появлением зон разгрузки (в некоторых элементах системы).

Поэтому представляется возможным постановка задачи, в которой будет исследоваться взаимное влияние внутренних дефектов материала. Распределенные дефекты в материалах не только приводят к возникновению трещин и окончательному разрушению, но и вызывают ухудшение свойств материала, в том числе уменьшение прочности, жесткости, вязкости, устойчивости и остаточного ресурса.

Трудность состоит в том, что в результате действия возмущающих (дополнительных) сил поверхность тела изменяется, и это обстоятельство должно было бы стимулировать постановку задачи о взаимном влиянии микроповреждений, распределенных в массиве тела. Однако в пластичности, как правило, связь σ_{ij} и e_{ij} задается в форме приращений (теория течения), в частности в виде выражений (1) и (2). Поэтому учет изменения поверхности тела считается фактором второстепенным или совсем ненужным.

С этой точки зрения решается и задача, поставленная в работе [2], в которой рассматривается ситуация, когда действует скрытая переменная. Неясно, как выбирать нелинейную модель, которая могла бы описать механизм внутреннего взаимодействия трещин при их пространственном распределении в массиве тела.

В конечном счете проблема заключается в том, чтобы получить условия развития или стабилизации большого числа трещин со статистическим учетом их взаимного влияния.

Эта задача решалась экспериментально в ЦНИДИ [10] (рис. 2). Были предусмотрены возможность рандомизации и простота обработки полученных результатов. Круглая пластина, жестко закрепленная по контуру, подвергалась кавитационному воздействию с помощью магнитострикционного вибратора. Потери массы образцами (пластины) оценивались путем взвешивания на аналитических весах. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода.

Как известно, особенностью таких испытаний является высокая скорость изнашивания металла, что дает возможность не учитывать влияние химических факторов. При этом механизм повреждения материала связан с пластической деформацией и деформирующим упрочнением. Рентгеновские измерения показали, что кавитационный эффект исчезает на глубине от 35 до 50 мкм. Поверхность, на которую приходится гидравлический удар схлопывающегося кавитационного пузырька, составляет ~ 10^{-5} мм^2, что соизмеримо с размерами отдельных структурных составляющих сплава [11, 12].

Необходимость рандомизации условий эксперимента в данном случае объясняется тем, что в первые часы испытаний образца кавитационному воздействию подвергается так называемый ослабленный поверхностный слой [13]. Для того чтобы составить представление о кинетике повреждений этого слоя и о последующем развитии повреждений материала, было выполнено следующее.

Шлифовальные образцы из стали 38 ХМЮА, рабочая поверхность которых с параметром шероховатости *Ra* от 0,80 до 0,63 мкм, подвергали кавитационному воздействию в течение 15, 20, 30 и 60 мин (по три образца для каждого из указанных периодов времени). В результате этого было установлено, что для данного материала время $t = 60$ мин является оптимальным временем однократного кавитационного воздействия на образец. В этом случае наблюдалась достаточная повторяемость потерь масс образцами, которая поддавалась логическому описанию. Было проведено четыре серии испытаний образцов. Продолжительность одного эксперимента $t = 71$ ч. Результаты первой серии испытаний представлены на рис. 3.

Потери массы образца за первый час испытаний сильно отличаются от потерь массы за второй час. Это объясняется реакцией на кавитационные воздействия ослабленного поверхностного слоя, который в данном случае сформировался в процессе изготовления образца. Далее разброс значений потерь массы стабилизируется и после восьмого часа становится сопоставимым со средней величиной разброса за период испытаний. Это, должно быть, свидетельствует о том, что ослабленный слой перестает оказывать заметное влияние на результаты эксперимента и в последующие часы кавитационному воздействию подвергается материал в исходной структуре.

На рис. 4 представлены макроструктуры поверхности образца через 2, 3, 5, 7, 9, 12 ч проведения испытаний. В результате стало возможным представить некоторую неопределенность, которая, по мнению исследователей, может влиять на величину потерь массы образцом. Возможно, эта неопределенность связана с изменением глубины и конфигурации впадин на поверхности образца. Однако в данном случае этого не наблюдалось, видимо, потому, что эффект возбуждения кавитации был таков, что слой жидкости во впадинах не мог оказать значительного влияния на повреждение материала.

Остановимся на том, до какой степени возможно создание учитываемых условий проведения эксперимента.

Средняя дисперсия оценки потерь массы поверхностного слоя в данном случае обеспечивается тем, что поверхностный слой является рандомизированным, т. е. имеет случайное распределение центров упрочнения и разупрочнения, но когерентным в том смысле, что поверхность сохраняет свою форму до тех пор, пока

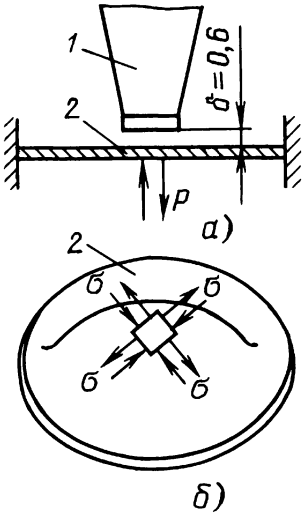


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (*а*) и исследуемая круглая пластина (*б*):
1 — излучатель; *2* — пластина

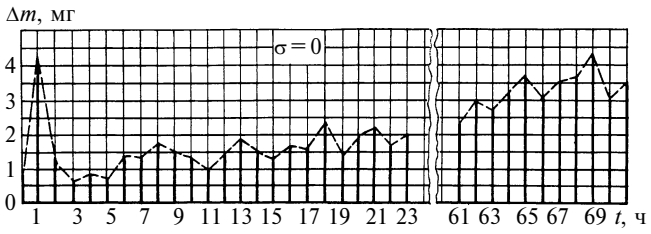


Рис. 3. Диаграмма потерь массы одного образца за каждые 60 мин кавитационного воздействия

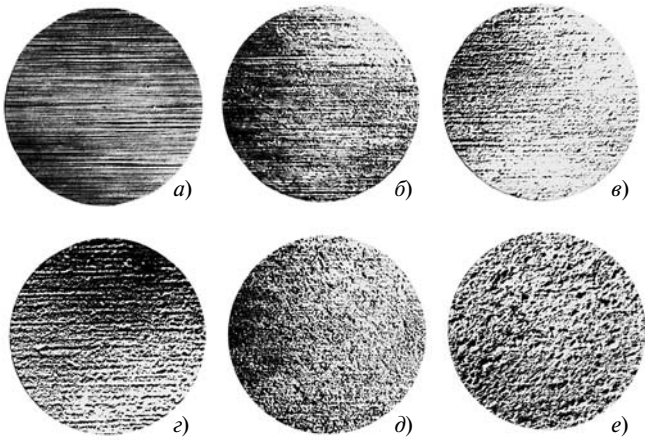


Рис. 4. Рельефы поверхности образца, снятые через определенное время после начала испытаний:
а—е — через 2, 3, 5, 7, 9, 12 ч соответственно

не будут удалены частицы материала, оторвавшиеся от основы. Таким образом, установленное экспериментально время кавитационного воздействия $t = 60$ мин является оптимальным для того, чтобы исключить влияние переменных, бесконтрольно изменяющихся во времени и пространстве, на результаты испытаний. Интенсивность повреждений в любой точке есть результат сложения элементарных воздействий схлопывающихся кавитационных пузырьков, которые достигают этой точки.

Эти условия являются оптимальными для проведения эксперимента, например для оценки сравнительной кавитационной стойкости металлов или для описания различных структурных изменений, происходящих в испытываемом материале.

Здесь исследуются взаимодействия микроповреждений, распределенных в массиве тела, для того чтобы дать количественную оценку влиянию такого взаимодействия на развитие повреждений в материале в зависимости от вида деформации конструктивного элемента механической системы (поверхности детали).

Заметим, что если к образцу с кавитационными повреждениями однократно приложить и снять нагрузку, то, очевидно, произойдет ухудшение свойств материала, которое остается недоступным для непосредственного наблюдения. Однако количественную оценку этому ухудшению можно дать, если подвергнуть образец кавитационному воздействию в течение 1 ч. Поэтому с учетом результатов первой серии испытаний образцов не составило труда провести следующие три

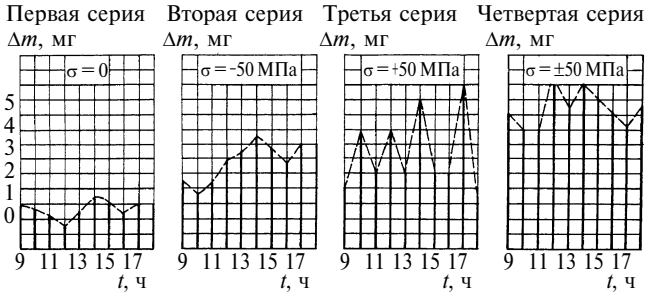


Рис. 5. Малая выборка по результатам четырех серий испытаний (по десяти замеров в каждой серии)

серии испытаний. Образцы подвергали следующим деформациям:

вторая серия испытаний: от 0 до $+\sigma = 50$ МПа и до 0;

третья серия: от 0 до -50 МПа и до 0;

четвертая серия: от 0 до $+\sigma = 50$ МПа, до 0, до $-\sigma = 50$ МПа и до 0.

На рис. 5 представлены результаты малых выборок из четырех серий испытаний (по десяти замеров из каждой серии, начиная с девятого часа испытаний). Очевидно существенное влияние вида деформирования на интенсивность развития повреждений.

Выводы

Конструктивная прочность изделий связана с особенностями внутренних процессов, происходящих в твердом теле при деформировании.

В зависимости от назначения изделия и его нагрузочной системы возникают многочисленные варианты работы внешних сил. Это обусловлено тем, что направление внешних сил зависит от жесткости конструктивных элементов, составляющий данный механизм, вследствие чего в отдельных элементах появляется режим связанного движения, характеризующийся потерей устойчивости процесса деформирования и появлением соответствующего ему режима внутреннего движения частиц сплошной поврежденной среды. Поэтому при логическом обосновании критерия устойчивости упругопластических систем возникают трудности. Так, предположение, что в исходном состоянии (устойчивость которого исследуется) отсутствуют деформации выпучивания (сжатый стержень — прямой, пластина — плоская и т. д.), относительно упругопластического поведения механической системы кажется сомнительным. И единственно правильным при решении данного вопроса является расчет конструкции с учетом ее малых начальных отклонений.

Однако ошибочно отождествляются два разных понятия: возмущения, накладываемые на детали в качестве дополнительных боковых воздействий (импульсов), и начальные отклонения формы.

Настоящей причиной потери устойчивости конструктивным элементом механической системы будет взаимное влияние внешних сил и перемещений элементов, являющихся причиной возникновения дополнительных нагрузок, которые приводят к появлению деформаций выпучивания.

Так как в конструкции существуют состояния, которые включены в непрерывную последовательность равновесных с фиксированными силами состояний, то дополнительные возмущения, накладываемые на поверхность детали, обычно отсутствующие при экспериментальных исследованиях, могут иметь место при эксплуатации. Именно этим обстоятельством объясняется возникновение внутреннего движения дефектов в твердом теле, оказывающего максимальное воздействие на процесс деформации.

Деформация выпучивания при действии дополнительных сил зависит от их параметров. Рассмотрим это подробнее.

Различают семь основных видов деформации, которые в той или иной степени влияют на механизм пла-

стической деформации твердого тела [14]. Вид пластической деформации зависит от того, какой из происходящих в твердом теле процессов контролирует в данном случае движение дефектов.

При потере механической системой устойчивости имеет место поперечная нагрузка на конструктивный элемент с механизмом максимального влияния на скорость деформации. Для подтверждения этого была разработана специальная методика испытаний круглых жестко закрепленных по контуру стальных пластин. Испытания показали, что скорость повреждения материала зависит от формы деформации. Разработанные способы повышения конструктивной прочности механических систем основаны на том, что, как правило, имеется возможность обеспечить режим устойчивого процесса деформирования путем оптимального конструктивного исполнения изделия [15—17].

Для того чтобы иметь представление о неустойчивости процесса деформирования, достаточно убедиться в его прерывистости. Важно и то, что любое изменение частоты приложения внешней нагрузки может полностью изменить интенсивность повреждения материала в ограниченном интервале времени.

Поэтому в отличие от классических задач теоретической механики на устойчивость движения, в которых главным фактором считается инерционность, в данном случае основным является связь элементарных частиц, точнее, специфика меняющихся связей, которая в какой-то степени схожа с освобождающимися связями при сухом трении. Здесь процесс становится прерывистым, поскольку неустойчивость является структурной.

Прерывистый характер явления возникает, когда сила трения, действующая на скользящее тело и слабо зависящая от скорости после начала скольжения, оказывается меньше силы, которая требуется для того, чтобы сдвинуть тело с места после остановки. Другими словами, если тело движется по некоторой поверхности с помощью пружины, то оно будет оставаться в зацеплении с этой поверхностью до тех пор, пока пружина не растянется и не сдвинет его с места. При этом тело получит ускорение, а натяжение пружины в начальный момент будет резко превышать силу трения скольжения; однако как только натяжение пружины уменьшится из-за ускоренного продвижения тела, последнее замедлит свой ход и в конце концов вновь войдет в зацепление с поверхностью. Затем процесс повторится.

Аналогичный процесс происходил и при испытаниях исследуемых пластин, нагружаемых поперечной силой. Поэтому схема сплошной среды, лежащая в основе аналитического аппарата теории развития трещин, неадекватна процессу, происходящему в поврежденной среде.

Структурные особенности материала с его реальными дефектами учитывались некоторой интегральной характеристикой сил сцепления элементарных частиц, влияющих на интенсивность развития повреждений, и оценивались величиной потерь массы испытываемой пластины.

Возникающие напряжения могут изменять потенциал атомов на поверхности в поликристалле. Однако гидростатическое напряжение приводит к одинаковому изменению потенциала по всему объему, и градиент (вектор интенсивности изменения параметра) потенциала равен нулю. В то же время напряжение с девиаторной компонентой изменяет потенциал атомов на поверхности одних зерен больше, чем других, что обусловливает появление ненулевого градиента. В последнем случае вопросы конструктивной и структурной прочностей материала смыкаются. Это подтверждается решенными задачами, например в случае, когда из-за разной жесткости конструктивных элементов механической системы возникают дополнительные силы, вызывающие выпучивание отдельных элементов, а также в том случае, когда конструкция в эксплуатационном режиме находится в условиях контакта с другим изделием и можно применить расчетную схему балки на упругом основании.

Таким образом, существуют внутренне неустойчивые механические системы, которые не могут достичь устойчивого состояния в связи с изменениями в работе одних элементов и возникновением в других дополнительных сил, которые возвращают систему в начальное неустойчивое состояние. Отличительным признаком процесса является прерывистый характер перехода материала из одного внутреннего состояния в другое, частота таких колебаний точно не определена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мороз Л. С.** Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Л.: Машиностроение, 1984. 224 с.
2. **Мураками С.** Сущность механики поврежденной сплошной среды и ее приложение к теории анизотропных повреждений при ползучести // Теоретические основы инженерных расчетов. 1983. № 2. С. 28—33.
3. **Феодосьев В. И.** Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1969. 172 с.
4. **Пановко Я. Г., Губанова И. И.** Устойчивость и колебание упругих систем. М.: Наука, 1967. 418 с.
5. **Зубчанинов В. Г.** Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 368 с.
6. **Зубчанинов В. Г.** Устойчивость при ползучести // Устойчивость и пластичность в механике деформируемого твердого тела: Междунар. науч. симпоз. Тверь: ТГТУ, 1999. С. 3—62.
7. **Клюшников В. Д.** Лекции по устойчивости деформируемых систем: Учеб. пособ. М.: Изд-во МГУ, 1986. 224 с.
8. **Ильюшин А. А.** Пластичность. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 356 с.
9. **Клюшников В. Д.** Математическая теория пластичности. Изд-во МГУ, 1979. 207 с.
10. **Яковлев В. В.** Условия возникновения и развития кавитационных повреждений в деталях дизелей и методы их устранения / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул: 1997. 32 с. Машинопись.
11. **Богачев И. Н.** Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. М.: Металлургия, 1972. 188 с.
12. **Исследование** кавитационной эрозии / Сюезава, Мацумура, Найаима, Цуда // Теоретические основы инженерных расчетов. 1972. № 4. С. 242—249.
13. **Суслов А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
14. **Фрост Х. Д., Эшби М. Ф.** Карты механизмов деформации: Пер. с англ. Л. М. Бернштейка. Челябинск: Металлургия, 1989. 328 с.
15. **Яковлев В. В.** Природа сил, вызывающих овальность втулок цилиндров в блоке при сборке двигателей // Вестник машиностроения. 2004. № 11. С. 24—27.
16. **Пат. 2073104 РФ.** Втулка цилиндра двигателя внутреннего сгорания с жидкостным охлаждением.
17. **Пат. 2256812 РФ.** Блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания с жидкостным охлаждением.

УДК 621.753.2:621.81

Е. В. КУЛИШ, Ю. В. ТУРЫГИН, д-р техн. наук (Ижевский ГТУ)

Методика расчета прессовых полисоединений

Дано определение понятия "прессовое полисоединение (ППС) с натягом", которое имеет минимум три детали в сборке. Рассмотрены условия взаимодействия деталей в ППС. Предложена методика расчета и проектирования полисоединений, позволяющая определять нагрузочную способность, напряженно-деформированное состояние и технологические параметры этой сборки.

A definition is given for the notation of "interference press poly-joint (PPJ)", which has three assembled components at the minimum. Conditions for the components interaction in PPJ are considered. Design procedure for poly-joints is suggested, which allows for determining loadability, mode of deformation and process variable of the assembly.

В конструкциях современных машин и механизмов широкое применение получили соединения с гарантированным натягом благодаря возможности восприятия и передачи произвольно направленных больших нагрузок. Особый класс соединений с гарантированным натягом составляют многоконтактные прессовые полисоединения (ППС), имеющие как минимум три детали в сборке [1]. Такой тип соединений с натягом широко распространен в машиностроении благодаря ряду существенных преимуществ: высокой ремонтопригодности; экономии дорогостоящих материалов; использованию промежуточных деталей в качестве уплотнителей, диэлектриков, центрирующих деталей, элементов, обеспечивающих более рациональное распределение напряжений в деталях, защищающих соединение от коррозии и других неблагоприятных факторов. Наиболее распространенный пример ППС, имеющего две радиально расположенные посадки, представлен на рис. 1.

Применение ППС зачастую является наиболее рациональным и надежным конструктивным решением для передачи осевых сил и крутящих моментов в узлах различных машин и механизмов. Однако широкому применению ППС препятствуют их недостаточная изученность и отсутствие методик расчета нагрузочной способности (НС) и напряженно-деформированного состояния (НДС) прессовых полисоединений. В связи с этим изыскания в направлениях повышения нагрузочной способности и совершенствования методик расчета ППС являются актуальными.

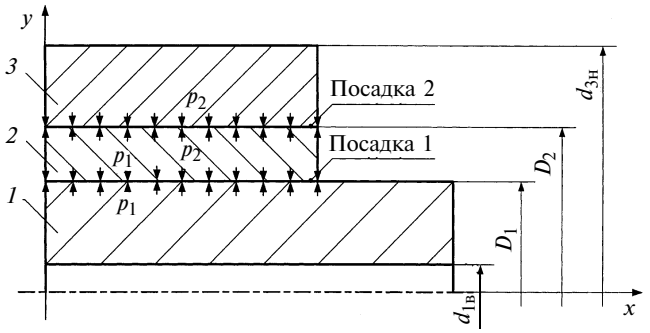


Рис. 1. Схема прессового полисоединения:
1 — охватываемая деталь (вал); *2* — промежуточная деталь (втулка); *3* — охватывающая деталь (ступица); D_1, D_2 — средние диаметры соответствующих посадок; d_1, d_2 — фактические диаметры деталей

Методика расчета ППС позволяет определить контактные давления в зонах посадок, от которых зависят НС полисоединения и НДС деталей. В основу метода расчета положены общеизвестные для деталей машин зависимости определения параметров соединений с натягом. В методике не используются дополнительные коэффициенты, позволяющие повышать точность расчета с учетом, например, разной длины зон посадок деталей или формы деталей [2—4].

При разработке методики было принято допущение, что полисоединение формируется следующим образом: сначала формируется соединение охватываемой и промежуточной деталей (см. рис. 1, детали *1* и *2*), а сформированное соединение собирается с охватывающей деталью *3*, образуя ППС с двумя посадками: 1 и 2.

С учетом взаимного влияния зон посадок деталей определяются контактные давления и перемещения посадочных поверхностей в полисоединении. В общем виде методика расчета ППС реализуется в следующем порядке.

Сначала определяют начальные значения натягов N_1, N_2, средние диаметры D_1 и D_2 посадок, внутренние $d_{1в}$, $d_{2в}$, $d_{3в}$ и наружные $d_{1н}$, $d_{2н}$, $d_{3н}$ фактические диаметры деталей до сборки полисоединения, физико-механические свойства материалов деталей.

В соответствии с принятым допущением по формированию полисоединения определяют контактное давление p_1 в условиях сборки соединения, образованного деталями *1* и *2*, при $i = 0$ (i — зоны контакта):

$$p_1 = \frac{N_1}{(C_1/E_1 + C_2/E_2)D_1},$$

где $C_1 = \dfrac{1+(d_{1в}/D_1)^2}{1-(d_{1в}/D_1)^2} - \mu_1$ и $C_2 = \dfrac{1+(D_1/d_{2н})^2}{1-(D_1/d_{2н})^2} + \mu_2$.

Здесь C_1, C_2 — коэффициенты жесткости; E_1, E_2 — модули упругости материалов деталей *1* и *2*; μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона.

Далее с учетом p_{1i} распределяют диаметры деталей, образующих посадку 1:

наружный диаметр детали *2* с учетом влияния натяга в сопряжении деталей *1* и *2*:

$$d_{2нi+1} = d_{2нi} + \frac{2p_{1i}d_{2нi}}{E_2[(d_{2нi}/D_{1i})^2 - 1]}; \qquad (1)$$

внутренний диаметр детали *1* с учетом влияния натяга в сопряжении деталей *1* и *2*:

$$d_{1\text{в}i+1} = d_{1\text{в}i} + \frac{2p_{1i}d_{1\text{в}i}}{E_1[1-(d_{1\text{в}i}/D_{1i})^2]}; \qquad (2)$$

наружный диаметр детали *1* в посадке 1, определяющий натяг N_{2i} на следующем шаге итерации,

$$d_{1\text{н}i+1} = d_{1\text{н}i} - \left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_1}-1\right)+\left(\frac{1}{\mu_1}+1\right)\left(\frac{d_{1\text{в}i}}{D_{1i}}\right)^2}{\frac{1}{\mu_1}E_1\left[1-\left(\frac{d_{1\text{в}i}}{D_{1i}}\right)^2\right]}p_{1i}D_{1i}\right]. \qquad (3)$$

Формулы (1)—(3) определяют диаметры деталей, принадлежащих посадке *1*, при $i = 0$ для соединения деталей *1* и *2*, а начиная с шага $i = 1$ — для полисоединения, образованного деталями *1*, *2* и *3*.

При изменившемся под воздействием сборки деталей *1* и *2* диаметре $d_{2\text{н}}$ уточняются натяг и средний диаметр посадки *2* в условиях сборки полисоединения при $i = 1$: $N_{2i} = d_{2\text{н}i} - d_{3\text{в}i-1}$; $D_{2i} = d_{2\text{н}i}$.

Далее определяют контактное давление p_{2i} для посадки 2 в условиях сборки полисоединения при $i = 1$:

$$p_{2i} = \frac{N_{2i}}{(C_{2,2i}/E_2 + C_{3,2i}/E_3)D_{2i}},$$

где $C_{2,2i} = \dfrac{1+(d_{1\text{в}i}/D_{2i})^2}{1-(d_{1\text{в}i}/D_{2i})^2} - \mu_2$ и

$C_{3,2i} = \dfrac{1+(D_{2i}/d_{3\text{н}i})^2}{1-(D_{2i}/d_{3\text{н}i})^2} + \mu_3$.

При расчете коэффициента $C_{2,2}$ необходимо учитывать, что внутренним диаметром охватываемой детали является внутренний диаметр конструкции полисоединения, т. е. детали *1*, а не детали *2*.

С учетом p_{2i} определяют диаметры деталей, образующих посадку 2:

наружный диаметр детали *3*:

$$d_{3\text{н}i} = d_{3\text{н}i-1} + \frac{2p_{2i}d_{3\text{н}i-1}}{E_3[(d_{3\text{н}i-1}/D_{2i})^2-1]};$$

внутренний диаметр детали *2*:

$$d_{2\text{в}i} = d_{2\text{в}i-1} + \frac{2p_{2i}d_{2\text{в}i-1}}{E_2[1-(d_{2\text{в}i-1}/D_{2i})^2]}.$$

Перемещение посадки 2 характеризуется внутренним диаметром $d_{3\text{в}i}$ детали *3*, определяющим натяг N_{1i} на следующем шаге итерации:

$$d_{3\text{в}i} = d_{3\text{в}i} + \left[\frac{\left(\frac{1}{\mu_3}+1\right)+\left(\frac{1}{\mu_3}-1\right)\left(\frac{D_{2i}}{d_{3\text{н}i}}\right)^2}{\frac{1}{\mu_3}E_3\left[1-\left(\frac{D_{2i}}{d_{3\text{н}i}}\right)^2\right]}p_{2i}D_{2i}\right].$$

При изменившемся под воздействием сборки в полисоединении деталей *2* и *3* диаметре $d_{2\text{в}}$ уточняют натяг и средний диаметр посадки 1: $N_{1i} = d_{1\text{н}i} - d_{2\text{в}i}$, $D_{1i} = d_{2\text{в}i}$.

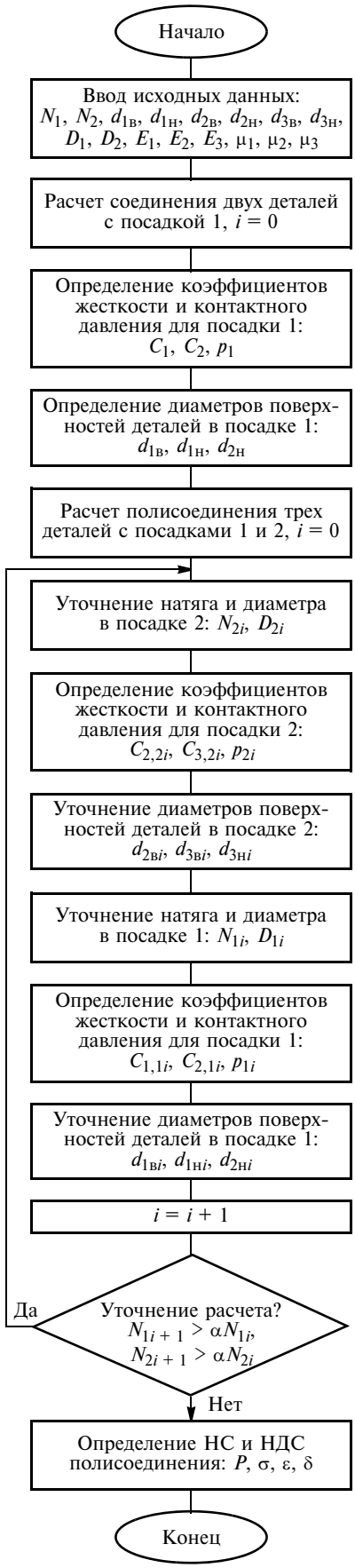


Рис. 2. Алгоритм расчета ППС

Затем определяют контактное давление p_{1i} для посадки 1 в условиях сборки полисоединения:

$$p_{1i} = \frac{N_{1i}}{(C_{1,1i}/E_1 + C_{2,1i}/E_2)D_{1i}},$$

где $C_{1,1i} = \dfrac{1+(d_{1вi}/D_{1i})^2}{1-(d_{1вi}/D_{1i})^2} - \mu_1$ и

$$C_{2,1} = \frac{1+(D_{1i}/d_{3н})^2}{1-(D_1/d_{3н})^2} + \mu_2.$$

Для коэффициента $C_{2,1}$ необходимо учесть, что наружным диаметром охватывающей детали является наружный диаметр конструкции полисоединения, т. е. детали *3*, а не детали *2*.

В случае необходимости достижения высокой точности расчета, начиная с формулы (1), при условии увеличения текущего индекса i на единицу расчет выполняется в итерационном режиме несколько раз с целью уточнения перераспределения контактных давлений. Критерием сгонки решения могут служить величины невязки натягов N_{1i} и N_{2i}, равные коэффициенту α, принимаемого обычно на уровне от 0,5 до 2 % от предыдущих значений натягов. Назначение коэффициента α определяет, как правило, число итераций в расчете ППС. Практика показывает, что для обеспечения сходимости результатов при расчете по алгоритму, предложенному для реализации данной методики (рис. 2), достаточно двух итерационных шагов.

При необходимости изменения очередности расчета полисоединения по представленной методике, например при изменении очередности формирования, нужна только перестановка индексов при параметрах ППС. При увеличении числа деталей в ППС добавляются аналогичные зависимости для новых деталей и посадок с соответствующими индексами.

С учетом найденных контактных давлений записываются условия прочности при разных видах нагрузок. Уточненные посадочные диаметры и контактные давления позволяют определить характеристики НДС деталей — радиальные и касательные напряжения и деформации, перемещения в деталях [2—4]. Отметим, что при определении напряжений в деталях необходимо учитывать наружные диаметры не соответствующих деталей, а полисоединения в целом. Для рассматриваемого примера представим зависимости для определения радиальных напряжений в деталях *1* и *3*:

$$\sigma_1 = -p_1 \frac{1-(d_{1в}/d_1^*)^2}{1-(d_{1в}/D_1)^2};$$

$$\sigma_3 = p_2 \frac{1-(d_{3н}/d_3^*)^2}{(d_{3н}/D_2)^2-1},$$

где d^* — диаметр сечения детали, в котором определяются напряжения.

Для промежуточной детали *2* уровень напряжений в сечении, определяемом величиной d_2^*, можно найти через зависимости (4) для охватываемой и (5) для охватывающей деталей:

$$\sigma_{2,2} = -p_2 \frac{1-(d_{1в}/d_2^*)^2}{1-(d_{1в}/D_2)^2}; \quad (4)$$

$$\sigma_{2,1} = p_1 \frac{1-(d_{3н}/d_2^*)^2}{(d_{3н}/D_1)^2-1}. \quad (5)$$

При определении других характеристик НДС деталей полисоединения [4] используется тот же принцип подстановки параметров контактных давлений и диаметров деталей.

Предложенная методика расчета учитывает взаимное влияние деталей в прессовом полисоединении, позволяет определять контактные давления в посадках и совместные перемещения посадочных поверхностей в зонах сопряжения. По найденным значениям можно определить нагрузочную способность конструкции и напряженно-деформированного состояния деталей. Методика прошла промышленную апробацию при расчете узла кривошипа нефтяной качалки и реализуется при назначении натягов в зонах сопряжения деталей и других технологических параметров, определяющих контактное давление, с целью обеспечения необходимых эксплуатационных свойств конструкций с полисоединениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Numerical-analytical** Methods in Perfection of Assembly Technique of Joints in Main Machines Units / E. V. Kulish, M. M. Abashev, A. V. Ivannikova, A. V. Schenyatskiy // Pollack Periodica. 2006. Vol. 1. N 2. P. 71—82. www.akademiai.com (Budapest. Hungary).
2. **Высоконапряженные** соединения с гарантированным натягом / И. В. Абрамов, Ф. Ф. Фаттиев и др. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. 300 с.
3. **Управление** нагрузочной способностью и напряженно-деформированным состоянием прессовых соединений / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, В. С. Клековкин, Ю. В. Турыгин // Вестник Ижевского государственного технического университета, 2001. № 4. С. 5—8.
4. **Берникер Е. И.** Посадки с натягом в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1966. 167 с.

УДК 629.7.036.5-543

В. И. БИРЮКОВ, канд. техн. наук (ГТУ МАИ)

Методика расчета амплитуды и частоты автоколебаний в камере ЖРД с термическим разложением гидразина

Методика может быть использована для определения области устойчивой работы, расчета амплитуды и частоты при жестком возбуждении автоколебаний в камере многорежимного ЖРД с термическим разложением гидразина, а также в качестве поверочного расчета на этапе проектирования.

The technique may be used to determine safe operating area, to calculate amplitude and frequency at self-oscillations rigid excitation in the multi-mode liquid-fuel rocket engine chamber with hydrazine thermal decomposition, also as a verifying calculation at the design stage.

Основные показатели гидразина (N_2H_4)

Молекулярная масса, кг/кмоль. 32,045
Энтальпия J при температуре 15 °С, Дж/кг. 1573
Критическая температура $T_{кр}$, К. . . .653
Критическое давление $p_{кр}$, МПа 14,69
Критическая объемная плотность ρ, м^3/кмоль 0,096
Температура замерзания, °С . . . . . +1,53
Температура кипения при давлении 760 мм рт. ст., °С . . . . . +113,5
Теплота образования, МГДж/кмоль 95,25
Свободная энергия Гиббса, МГДж/кмоль 158,64
Теплота $h_{исп}$ фазового перехода $[(N_2H_4)_ж \to (N_2H_4)_{газ} + h_{исп}]$, Дж/кг 1398686,50336

Плотность гидразина в жидком состоянии находится по формуле

$$\rho_ж = 1{,}0253 - 0{,}00871 t_ж, \quad 10^{-3}\ кг/м^3, \qquad (1)$$

где $t_ж$ — температура топлива, °С.

Теплоемкость гидразина при постоянном давлении в жидком состоянии рассчитывается по формуле $c_ж = 3228{,}2207 - 2{,}84966T + 0{,}0079738T^2$, Дж/(кг · К).

Уравнение скрытой теплоты испарения имеет вид:

$$h_{исп}(T_ж) = a_{0исп} + b_{0исп}T_ж + c_{0исп}T_ж^2 + d_{0исп}T_ж^3 + e_{0исп}T_ж^4 + f_{0исп}T_ж^5, \qquad (2)$$

где $T_ж$ — температура топлива, К.

Подставив значения констант $a_{0исп}$, $b_{0исп}$, $c_{0исп}$, $d_{0исп}$, $e_{0исп}$, $f_{0исп}$, $h_{исп}$ в уравнение (2), получим:

$$h_{исп}(T_ж) = 2{,}07574133 \cdot 10^6 - 3698{,}9216T_ж + 7{,}12764T_ж^2 - 895{,}8146T_ж^3 + 0{,}40850757 \cdot 10^{-5} \times T_ж^4 - 108{,}957138 \cdot 10^{11} T_ж^5,\ Дж/кг.$$

Свойства пара

Теплоемкость при постоянном давлении рассчитывают по формуле $c_p = A + BT + CT^2 + DT^3$, кДж/(кмоль · К), где $A = 9{,}768$; $B = 0{,}1894$; $C = -0{,}0001657$; $D = 6{,}02 \times 10^{-0{,}8}$.

Давление насыщенного пара находится в зависимости от температуры:

$$\ln p_v = 1{,}02719737 - 221{,}1506579/(t_ж + 227{,}74),\ кПа. \qquad (3)$$

Для предлагаемой методики необходимо знать следующие параметры камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД): площадь критического сечения $F_{кр.с} = \pi d_{кр.с}^2/4$ ($d_{кр.с}$ — диаметр критического сечения); площадь поперечного сечения $F_{п.с} = \pi d_{п.с}^2/4$ ($d_{п.с}$ — диаметр поперечного сечения); длину $l_к$ цилиндрического участка камеры; скорректированную длину l_c дозвуковой части сопла; степень сужения $\varepsilon_к$ дозвуковой части сопла; объем камеры $V_{кс} = V_к + V_c$ ($V_к$ — объем цилиндрического участка камеры, V_c — объем дозвуковой части сопла).

Известны: расходная характеристика форсуночной головки, т. е. перепады давлений $\Delta p_м$ и $\Delta p_ф$ на магистрали и форсуночной головке соответственно; массовый расход топлива $\dot{m}_{впр} = f(\Delta p_ф)$ или $\dot{m}_{впр} = f(\Delta p_м)$.

Параметры распыления

Средний медианный размер капель $d_{ср.м} = f(\dot{m}_{впр})$. Для испытываемой камеры известна зависимость $p_к = f(\dot{m}_{впр})$, где

$$\dot{m}_{впр} = \frac{p_к F_{кр.с}}{\varphi_к \beta}, \qquad (4)$$

здесь $\varphi_к$ — коэффициент камеры, характеризующий полноту разложения; β — расходный комплекс.

При проектировании ЖРД определяются термодинамические параметры и коэффициенты теплоты и массопереноса, а также диффузии из термодинамического расчета для фиксированного режима ($p_к$ = const) путем решения уравнения Стефана с учетом частичной диссоциации аммиака в условиях локального термодинамического равновесия. Одновременно учитывается то обстоятельство, что степень диссоциации аммиака (x) при термическом разложении гидразина находится в пределах от 0,25 до 0,4 [1, 2].

Далее определяют состав продуктов разложения и тепловой эффект реакции:

$$3N_2H_4 \to 4(1 - x)NH_3 + (1 + 2x)N_2 + 6xH_2 + q_{тв}. \qquad (5)$$

Входные величины для термодинамического расчета

Температуру жидкого гидразина в форсуночной головке обозначим $T_{ж0}$. Плотность топлива $\rho_ж$ и энтальпия J гидразина находят из формулы (1) при температуре впрыска.

Равновесное разложение аммиака осуществляется при $p_к$ или при фиксированном значении x.

Выходные параметры термодинамического расчета

Выходные параметры, полученные из термодинамического расчета [2, 3], рассмотрим на примере изоэнтропического процесса разложения чистого гидразина в изобарной камере (равновесное разложение аммиака при $p_к$ = 6 МПа):

Энтальпия продуктов разложения, Дж/кг. 1573

Среднее значение температуры T смеси газов, К 902,83
Удельный импульс $I_{у.и.п}$ в пустоте, м/с 1583
Газовая постоянная $R_г$ смеси продуктов разложения, Дж/(кг · К) 762,05
Расходный комплекс $\beta_т$, м/с 1258
Показатель k изоэнтропы 1,3627
Скорость звука $a_{зв}$, м/с 959,38
Удельная теплоемкость $c_{рг}$ смеси газов в камере при постоянном давлении, Дж/(кг · К) 2862
Молекулярная масса $M_г$ продуктов разложения, кг/кмоль. 10,691
Коэффициент μ динамической вязкости смеси газов, Н · с/м^2. 0,000033
Состав смеси газов продуктов разложения, моль/кг:
водород (H_2) 59,46
азот (N_2) 30,22
аммиак (NH_3) 1,97
Коэффициенты диффузии, $10^{-0,5}$ м^2/с:
k_{dH_2} 0,4455
k_{dH} 1,62
k_{dN_2} 0,455
k_{dNH_3} 0,441

Влияние давления в камере ЖРД на основные термодинамические параметры топлива при равновесном термическом разложении гидразина показано на рис. 1.

Режим процесса задан, стационарные параметры рабочего процесса в камере вычисляются по формулам, приведенным в работах [1, 3], определяется $\beta_т$ — теоретическое значение расходного комплекса, по формуле (4) находится $\beta_э$ — экспериментальное значение расходного комплекса.

Коэффициент, характеризующий полноту процесса преобразования, определяется отношением $\varphi_к = \beta_э/\beta_т$.

Расчет параметров, определяющих динамику процесса преобразования, баланс массы и тепловое состояние камеры

Исходные уравнения сохранения массы пара гидразина и энергии в камере ЖРД имеют вид:

$$d\rho/dt = \dot{m}_{впр}/V_{к.с} - (k + F_{к.с}u_г/V_{к.с})\rho; \quad (6)$$

$$dT/dt = q_{тв}k\rho/(\rho_0 c_р) - \lambda(T - T_0) - \alpha_0(T - T_{ст}), \quad (7)$$

где ρ — концентрация пара гидразина по массе; T_0 — температура пара гидразина; $T_{ст}$ — температура внутренней стенки камеры; T, ρ_0 — соответственно температура и плотность смеси газов, включая продукты разложения; $c_р$ — теплоемкость пара гидразина.

Параметр λ в уравнениях (6) и (7) характеризует скорость выноса тепловой энергии из камеры: $\lambda = F_{к.с}u_г/V_{к.с} = 1/\Theta_к$.

Время пребывания газа в цилиндрической камере рассчитывается по формуле $\Theta_к = (l_к + l_с)\dfrac{\varepsilon_к c^*}{RT}$, где $l_к$ — длина цилиндрического участка камеры; l_c — скорректированная длина дозвуковой части сопла; $\varepsilon_к$ — степень сужения сопла; c^* — скорость газов в критическом сечении.

Параметры идеальной газовой смеси в камере определяются уравнением состояния: $p_к = \rho_0 R_г T$.

Тепловой поток, идущий к капле, определяется выражением

$$Q_к = \pi d_{ср.м} Nu_t c_р (T - T_0), \quad (8)$$

где $d_{ср.м}$ — средний медианный диаметр капель; $Nu_t = (2 + 0{,}6\mathrm{Re}^{0,5} \times \mathrm{Pr}^{0,33})k_d$ — тепловой критерий Нуссельта (здесь Re, Pr — соответственно критерии Рейнольдса и Прандтля; $k_d \approx 0{,}7 \div 1$ — поправочный коэффициент, учитывающий влияние вынужденной конвекции и коллективных эффектов на подвод теплоты к капле).

Теплота при послойном испарении (Fo < 1, Fo — критерий Фурье) расходуется на испарение капли:

$$Q_к = \frac{1}{6}\pi d^3_{ср.м}\,[c_ж(T_0 - T_ж) + h_{исп}(T_0)]. \quad (9)$$

Скрытая теплота испарения определяется по формуле (2). Из баланса теплоты и равенства уравнений (8) и (9) определяется температура T_0 пара и затем по формуле (3) — давление p_v насыщенного пара.

Из расчета теплового состояния камеры сгорания определяется коэффициент α теплоотдачи от газа к внутренней стенке камеры и приведенный коэффициент α_0, характеризующий скорость теплоотдачи в стенки камеры: $\alpha_0 = \alpha S_{к.с}/(V_{к.с}\rho_0 c_р)$, где $S_{к.с}$ — площадь стенок камеры ЖРД.

Зависимость эффективной константы k_s скорости разложения можно получить по методу равнодоступной поверхности для одинаковых по размеру капель гидразина [1]: $k_s = p_v k_\infty/(p_v + RTk_\infty/k_0)$, с$^{-1}$, где k_∞, k_0 — константы скорости химической реакции первого и второго порядка соответственно, моделирующие процесс термического разложения гидразина с учетом диффузии; p_v — давление насыщенного пара гидразина:

$$k_\infty = 10^{13,6}\exp(-E_1/RT),\ \text{с}^{-1}; \quad (10)$$

$$k_0 = 10^{9,37}\exp(-E_2/RT),\ \text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}). \quad (11)$$

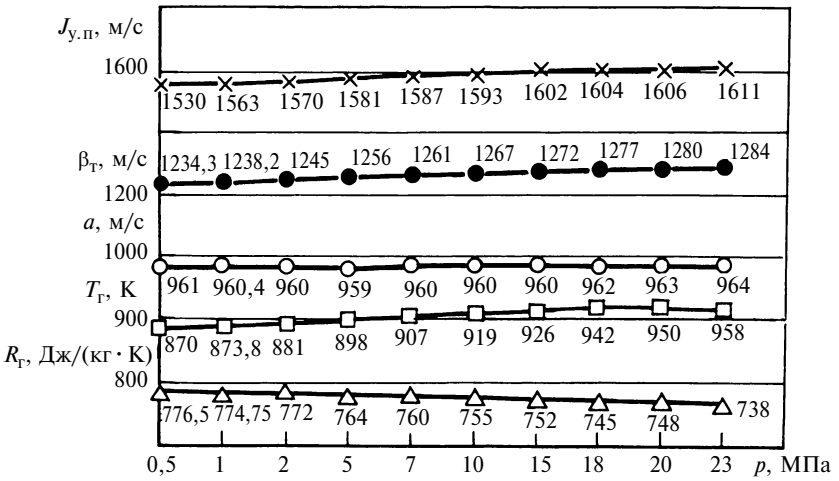


Рис. 1. Зависимости изменения термодинамических параметров топлива от давления в камере ЖРД при равновесном термическом разложения гидразина

Эффективная энергия активации определяется по формуле $E = 4{,}189 \cdot 10^3\{E_1 - (RTk_\infty/k_0)(RT + \Delta E)/(p_v + RTk_\infty/k_0)\}$, Дж/моль, где $E_1 = 222{,}07$ кДж/моль и $E_2 = 1663{,}43$ кДж/моль — соответственно энергии активации реакций из уравнений (10) и (11); $\Delta E = E_1 - E_2$.

Для оценки общего количества теплоты, выделяющейся в результате реакции, можно воспользоваться формулой (5).

Коэффициенты, необходимые для определения параметров, описывающих динамику камеры

Стационарная температура газа в камере $T_s = T$, К. Параметр, характеризующий активность паров гидразина, имеет вид: $\mu = RT_s/E$.

Постоянная для фиксированного режима, учитывающая подвод энергии в камеру, находится из уравнения $\beta = \lambda T_0 + \alpha_0 T_{ст}$, К/с.

Уравнение динамической системы, в состав которой входит линейное звено, обладающее свойством фильтра, имеет вид: $a_1 d^2Y/dt^2 + b_1 a_1 dY/dt + Y = X$. Здесь $a_1 = 1/[(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)]$ и $b_1 = 2\lambda + \alpha_0 + k_s$ — коэффициенты линейной части уравнения.

Передаточная функция линейного звена разомкнутой динамической системы представлена в удобном для анализа виде:

$$W_л = \frac{1}{(\sqrt{a_1})^2 s^2 + 2\left(\frac{b_1\sqrt{a_1}}{2}\right)\sqrt{a_1}s + 1}.$$

Значение $\frac{b_1\sqrt{a_1}}{2} \geqslant 1$ характеризует свойства фильтра линейного звена.

Значение амплитуд автоколебаний звена определяется из уравнения для границы устойчивости разомкнутой динамической системы:

$$\varphi_a A_a^4 + \varphi_b A_a^2 + \varphi_c = 0, \qquad (12)$$

где

$\varphi_a = [(\lambda + \alpha_0)\mu^3 - 5\beta\mu^3/T_s - \alpha_3 k_s]/[8(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)]$;

$\varphi_b = [(\lambda + \alpha_0)\mu - 3\beta\mu/T_s - \alpha_1 k_s]/[4(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)]$;

$\varphi_c = [(\lambda + \alpha_0)/\mu - \beta/(\mu T_s) - (2\lambda + \alpha_0 + k_s)]/[(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)]$.

Здесь коэффициенты α_1—α_5, полученные от разложения экспоненты в ряд, находятся из уравнений:

$\alpha_1 = 1 - \mu$;

$\alpha_2 = 1/6 - \mu + \mu^2$;

$\alpha_3 = 1/24 - 1/2\mu + 3/2\mu^2 - \mu^3$;

$\alpha_5 = 1/120 - 1/6\mu + \mu^2 - 2\mu^3 + \mu^4$.

Существование автоколебательного процесса определяется из условия $\varphi_c > 0$. При этом частота автоколебаний находится решением уравнения $a_1\omega^2 = 1 - \psi_a A_a^4 - \psi_b A_a^2 - \psi_c$, где коэффициенты ψ_a, ψ_b, ψ_c имеют вид:

$$\psi_a = 5/8[(\lambda + \alpha_0)k_s\alpha_3 - \alpha_5 Z_0]/[(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)];$$

$$\psi_b = [(\lambda + \alpha_0)k_s - 3/4Z_0\alpha_3]/[(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)];$$

$$\psi_c = [(\lambda + \alpha_0)k_s + Z_0]/[(\lambda + \alpha_0)(k_s + \lambda)].$$

Параметр Z_0 определяет подпитку колебательной системы энергией:

$$Z_0 = [\beta + q_{тв}\dot{m}_{впр}/(V_{к.с}\rho_0 c_р) - (\lambda + \alpha_0)T_s]k_s/(\mu T_s).$$

Пересчет значений амплитуды колебаний температуры на значения колебания давления в камере

Относительные амплитуды A колебаний температуры, полученные из уравнения (12), пересчитываются на абсолютные значения T через среднюю температуру T_s газа: $T = T_s + A(RT_s^2)/E$. Далее, учитывая связь между давлением и плотностью для изоэнтропного процесса, находим $p_к = \rho k = \text{const}$ (k — показатель изоэнтропы). Получим зависимость для пересчета колебаний температуры: $p_к = [RT(\text{const})^k]^{k/(k-1)}$.

На рис. 2 показаны зависимость изменения относительной амплитуды автоколебаний от температуры предварительного подогрева гидразина перед впрыском, которая является расчетной границей устойчивости для модельной камеры с термическим разложением гидразина. Определен диапазон температур, обеспечивающих устойчивые режимы.

На рис. 3 показана зависимость изменения относительной амплитуды колебаний давления от времени пребывания газа в камере, которая является расчетной границей устойчивости для модельной камеры с термическим разложением гидразина с учетом влияния размеров камеры, т. е. демпфирование автоколебаний путем увеличения размеров камеры.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости амплитуды и частоты автоколебаний, полученные экспериментальным путем при дросселирова-

Рис. 2. Зависимость изменения относительной амплитуды автоколебаний ($2A/p$) от температуры $T_{п.р}$ предварительного разогрева гидрозина перед впрыском ($\Theta_к$ = const)

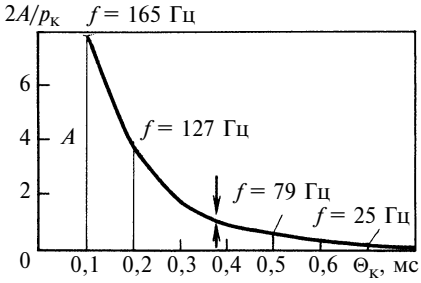


Рис. 3. Зависимость изменения относительной амплитуды колебаний ($2A/p_к$) давления от времени $\Theta_к$ пребывания газа в камере ($\Theta_к$ = var):
A — область неустойчивых режимов, жесткое возбуждение

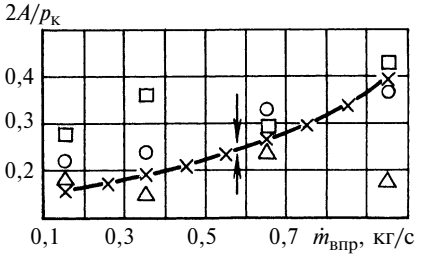


Рис. 4. Зависимость изменения относительной амплитуды колебаний ($2A/p_к$) от расхода гидрозина по результатам огневых испытаний модельной камеры

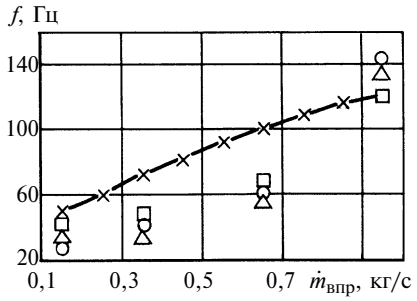


Рис. 5. Зависимость изменения частоты *f* автоколебаний при дросселировании модельной камеры от расхода $\dot{m}_{впр}$ гидрозина

нии модельной камеры, от расхода гидрозина, а также их расчетные значения, полученные с помощью предлагаемой методики. Смесительная головка камеры была укомплектована тремя двухсопловыми регулируемыми центробежными форсунками. При расходе 0,2÷0,3 кг/с разница расчетных данных и результатов, полученных экспериментально, обусловливается ухудшением качества распыления топлива при подключении большерасходных ступеней форсунок.

Предлагаемая методика расчета не учитывает изменение тепловой емкости жидкой фазы топлива. Промежуточные режимы описываются линейной моделью неустойчивости [1, 2].

Выводы

1. При изменении режима в камере дросселируемых ЖРД с термическим разложением гидразина могут возникать автоколебания термокинетической природы.

2. Причиной возбуждения автоколебаний могут быть любые скачки давления, превышающие пороговые значения. Например, в гнездах датчиков давления или на кромках сопел может скапливаться гидразин, который при перегреве может срываться.

3. Камеры ЖРД с термическим разложением гидразина должны рассчитываться на предмет существования предельных циклов по приведенной выше методике, при испытаниях они должны проверяться на динамическую устойчивость путем введения искусственных возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бирюков В. И.** Особенности низкочастотной внутрикамерной неустойчивости рабочего процесса в регулируемых ЖРД на гидразине: Дис. ... канд. техн. наук. М: МАИ. 1985. 204 с.

2. **Бирюков В. И.** Организация рабочего процесса в перспективных ЖРД с глубоким и плавным регулированием тяги на гидразине // Сб. трудов VI междунар. конф. "Неравновесные процессы в соплах и струях". СПб.: С-ППУ, 2006.

3. **Трусов Б. Г.** Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах // Программный комплекс Астра. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997.

УДК 621.833.1

А. Ф. Мамедов, канд. техн. наук (Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку)

Кинематический анализ движения ведомого цилиндрического зубчатого колеса с прямыми зубьями

Определяется закон изменения угловой скорости и углового ускорения ведомого зубчатого колеса.

Law of variation of the angular velocity and of angular acceleration for the driven spur gear is determined.

При проектировании зубчатых передач принимается, что ведущее и ведомое зубчатые колеса вращаются с постоянными угловыми скоростями [1—4], однако на самом деле ведомое зубчатое колесо вращается с переменной угловой скоростью, вследствие чего вал ведомого зубчатого колеса работает с циклическими нагрузками.

Будем считать, что зубчатое колесо — цилиндрическое, а его зубья — прямые.

Зацепление зубчатых колес начинается в точке встречи начального радиуса ведущего зубчатого колеса и наружного радиуса ведомого зубчатого колеса. Эта точка совершает сложное движение. При этом движение ведущего зубчатого колеса для точки встречи будет абсолютным, а движение ведомого зубчатого колеса — переносным. Движение же точки на линии зацепления будет относительным движением.

На рис. 1 показано зацепление ведущего и ведомого зубчатых колес, где $\varphi_1 = \omega_{1t}$ и φ_2 — соответственно углы поворота ведущего и ведомого зубчатых колес; ω_1, ω_2 — угловые скорости соответственно ведущего и ведомого зубчатых колес; t — время.

Определим зависимость угловой скорости ведомого зубчатого колеса от угловой скорости ведущего зубчатого колеса. Из ΔBAO_1, ΔBMO_1 и ΔO_1O_2M следует:

$$O_1B = r_0 \cos\alpha;$$
$$O_1M = \frac{r_0\cos\alpha}{\cos(\alpha + \varphi_1 - \pi/z_1)}, \quad (1)$$

где α — угол зацепления.

Из ΔO_2CM и ΔACO_2 видно:

$$O_2M = \frac{R_0\cos\alpha}{\cos(\alpha + \varphi_2)}. \quad (2)$$

Из ΔO_1MD и ΔO_2MD следует, что

$$O_1M\sin(\pi/z_1 - \varphi_1) = O_2M\sin\varphi_2. \quad (3)$$

Подставив выражения (1) и (2) в формулу (3), получим изменение угла φ_2 поворота ведомого зубчатого колеса в зависимости от угла φ_1 поворота ведущего колеса:

$$\mathrm{tg}\varphi_2 = \frac{r_0 \mathrm{tg}(\pi/z_1 - \varphi_1)}{R_0 + (R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \mathrm{tg}(\pi/z_1 - \varphi_1)}$$

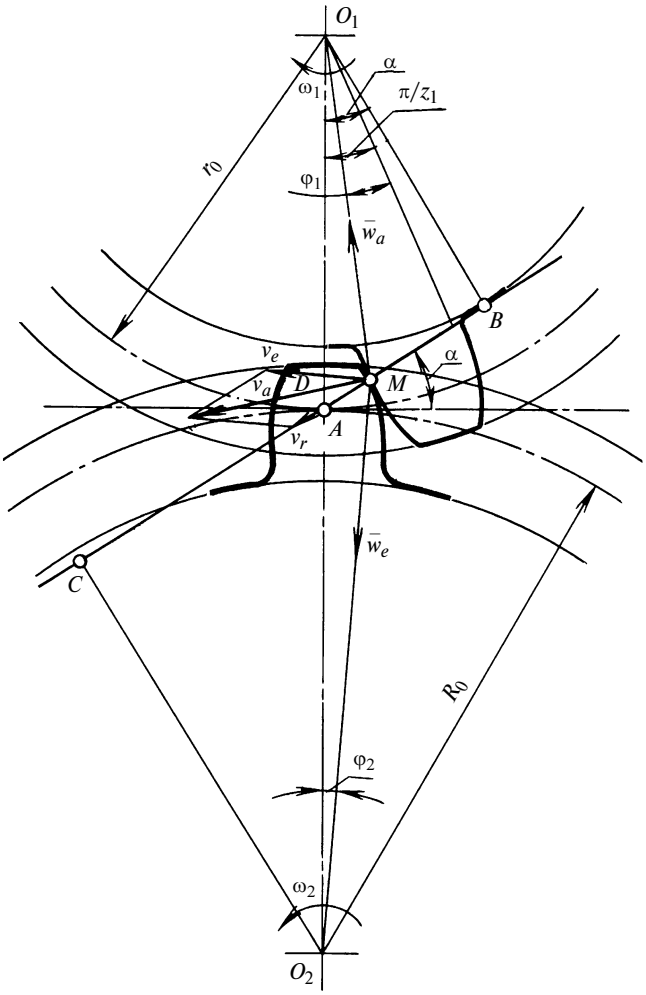


Рис. 1. Зацепление цилиндрических зубчатых колес с прямыми зубьями

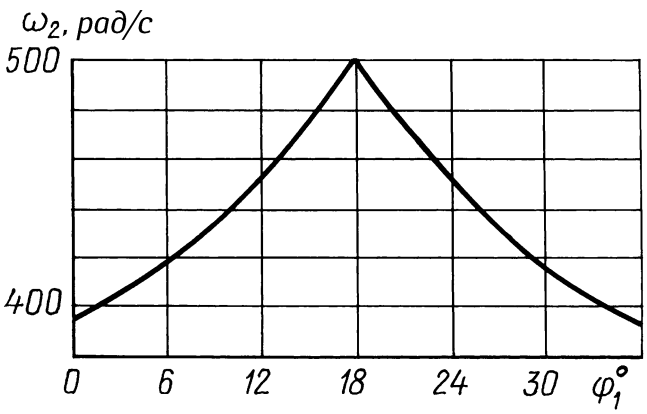


Рис. 2. График изменения угловой скорости ведомого зубчатого колеса от угла поворота ведущего зубчатого колеса

или

$$\varphi_2 = \mathrm{arctg}\left\{ \frac{r_0 \mathrm{tg}(\pi/z_1 - \varphi_1)}{R_0 + (R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \mathrm{tg}(\pi/z_1 - \varphi_1)} \right\}. \qquad (4)$$

Продифференцируем уравнение (4) по времени и получим закон изменения угловой скорости ведомого зубчатого колеса:

$$\omega_2 = \frac{R_0 \times}{[R_0 \cos(\pi/z_1 - \varphi_1) + (R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \sin(\pi/z_1 - \varphi_1)]^2 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times r_0 \omega_1}{+ r_0^2 \sin^2(\pi/z_1 - \varphi_1)}.$$

Абсолютная скорость точки зацепления $\bar{v}_a = \bar{v}_e + \bar{v}_r$.

Из рис. 1 найдем значение абсолютной скорости точки зацепления:

$$v_a = \omega_1 O_1 M = \frac{\omega_1 r_0 \cos\alpha}{\cos(\alpha + \varphi_1 - \pi/z_1)}.$$

Тогда переносная v_e и относительная v_r скорости точек зацепления находятся по формулам:

$$v_e = \omega_2 O_2 M =$$

$$= \frac{\omega_1 R_0^2 r_0 \cos\alpha}{[R_0 \cos(\pi/z_1 - \varphi_1) + (R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \sin(\pi/z_1 - \varphi_1)]^2 \cos(\alpha + \varphi_1)};$$

$$v_r = v_a \frac{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sin(\alpha + \varphi_2)}.$$

Угловое ускорение ведомого зубчатого колеса определяется выражением

$$\varepsilon_2 = \omega_1^2 R_0 r_0 \times$$

$$\times \frac{[(R_0 + r_0)^2 \mathrm{tg}^2\alpha + 2r_0^2 - R_0^2]\sin(2\pi/z_1 - \varphi_1) +}{\{[R_0 \cos(\pi/z_1 - \varphi_1) + (R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \sin(\pi/z_1 - \varphi_1)^2]^2 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ R_0(R_0 + r_0)\mathrm{tg}\alpha \cos(2\pi/z_1 - \varphi_1)}{+ r_0^2 \sin^2(\pi/z_1 - \varphi_1)\}^2}.$$

На рис. 2 представлен график изменения угловой скорости ведомого зубчатого колеса при следующих данных: $z_1 = 10$; $z_2 = 20$; $m = 10$ мм; $n_1 = 1000$ мин $^{-1}$. Угловая скорость этого зубчатого колеса изменяется в зависимости от параметра φ_1. При $\varphi_1 = \pi/z_1$ передаточное число $i = \omega_1/\omega_2 = R_0/r_0$. В остальных случаях $\omega_1/\omega_2 \neq R_0/r_0$. Разница между максимальным и минимальным значениями угловой скорости ведомого зубчатого колеса относительно максимального значения составляет 21,8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудрявцев В. Н.** Детали машин. Л.: Машиностроение, 1980. 464 с.
2. **Иосилевич Г. В.** Детали машин. М.: Машиностроение, 1988. 367 с.
3. **Левенсон Л. Б.** Кинематика механизмов. М., Л.: 1933. 249 с.
4. **Артоболевский И. И.** Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1975. 638 с.

УДК 629.113.62-235; 621.85

И. К. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук (Вологодский ГТУ)

Энергетический КПД машины с частичной рекуперацией энергии

Энергетический анализ машин, работающих в реальных условиях, как правило, невозможно выполнить на основе традиционного механического КПД [1—8]. Поэтому было предложено использовать для этого энергетический КПД машины — универсальный комплексный критерий, который учитывает энергетическое совершенство всех трех компонентов машины: энергоустановки, трансмиссии и рабочего органа, а также эффективность использования данной машины, т. е. степень занятости ее в технологическом процессе.

Принцип расчета энергетического КПД не зависит от конструктивного вида машины и характера взаимодействия ее с окружающей средой. Вычисляется энергетический КПД на основе баланса энергопотребления машины, определяемого результатами экспериментальных исследований, по формуле

$$\eta_э = W_{пол}/(W_{пол} + W_{непр}) = W_{пол}/W, \qquad (1)$$

где $W_{пол}$ — полезные затраты энергии за определенное время T протекания технологического процесса, совершаемого машиной, Дж; $W_{непр}$ и W — непроизводительные и суммарные затраты энергии за тот же период времени, Дж.

При этом полезные и непроизводительные затраты энергии получают на основе экспериментов путем интегрирования текущих значений относительно полезной $N_{пол}$ и непроизводительной $N_{непр}$ мощностей за время T:

$$W_{пол} = \int_0^T N_{пол}(t)dt;$$

$$W_{непр} = \int_0^T N_{непр}(t)dt.$$

Во многих случаях при энергетических исследованиях аналитическим путем удобнее использовать традиционный механический КПД, который определенным образом взаимосвязан с энергетическим КПД, в частности, для анализа машины непрерывного действия расчетная формула энергетического КПД имеет вид:

$$\eta_э = \frac{N_н \eta_н k_a}{N_н \eta_н k_b + N_x k_с},$$

где k_a, k_b, $k_с$ — постоянные интегрирования, характеризующие особенности данного процесса; $N_н$ — номинальная мощность энергоустановки, кВт; N_x — мощность, необходимая для совершения холостого хода машины, кВт; $\eta_н$ — номинальный механический КПД машины.

Когда машина работает с постоянной нагрузкой, близкой к номинальной, ее энергетический и механический КПД равны:

$$\eta_э = \eta_н. \qquad (2)$$

Мы использовали энергетический КПД для анализа машин, которые непрерывно потребляют энергию в течение всего технологического процесса. Однако существует большое число устройств, которые в определенный момент времени рекуперируют часть энергии. К таким машинам можно отнести электрифицированные транспортные и тяговые средства: электровозы, троллейбусы, трамваи, машины с электромеханической трансмиссией различного назначения, электромобили.

Очевидно, что рекуперация энергии повышает энергетическую эффективность машины, поэтому особенный интерес представляет разработка методики аналитического расчета энергетического КПД для данной группы машин.

Будем решать подобную задачу применительно к электромобилю, оборудованному аккумулятором электрической энергии (химический источник тока, ионисторы и т. п.), электродвигателем, способным работать в режиме генератора, и механической передачей (планетарный редуктор). Номинальный механический КПД этого устройства будет:

$$\eta_н = \eta_{и.т}\eta_{эд}\eta_{м.п} = 0{,}8 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 0{,}65,$$

где $\eta_{и.т}$ — КПД источника тока; $\eta_{эд}$ — номинальный КПД электродвигателя; $\eta_{м.п}$ — номинальный КПД механической передачи.

Рассмотрим один из возможных вариантов движения электромобиля. Автомобиль преодолевает путь длиной S за время T с постоянной скоростью $v_а$ (см.рисунок). Учитывая профиль автомобильной дороги и изменяющиеся условия движения машины, разобьем весь путь на пять участков: $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$ ($S_1 = 0{,}5S$; $S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0{,}125S$).

Задача: на основе баланса полезных и непроизводительных затрат энергии требуется определить энергетический КПД на каждом участке пути и вычислить среднее значение энергетического КПД автомобиля за пройденный путь.

Участок 1. На участке *1* идет накопление потенциальной энергии $W_п$ автомобиля, которая в конце подъема будет: $W_п = mqh$, где m — масса автомобиля; q — ускорение свободного падения; h — максимальная высота продольного рельефа дороги.

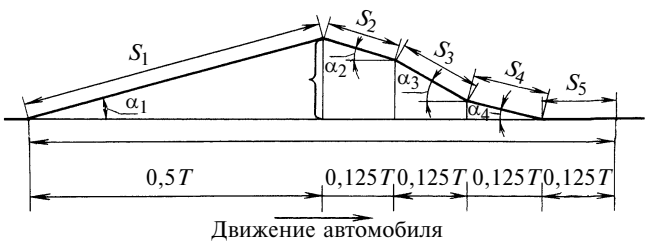


Схема продольного профиля автомобильной дороги

Согласно теории тягового расчета автомобиля [1] сила тяги $P_к$ на ведущих колесах на первом участке имеет вид:

$$P_к = F_к + F_в + F_i = mqf + KFv_a^2 + mq\sin\alpha_1,$$

где $F_к$ — сила сопротивления качению ($F_к = mqf\cos\alpha$, однако ввиду того, что уклоны продольного профиля дороги имеют небольшие значения, при выполнении тягового расчета автомобиля обычно принимают $\cos\alpha = 1$; α — угол уклона участка дороги); $F_в$ — сила сопротивления воздуха; F_i — сила сопротивления от уклона; f — коэффициент сопротивления качению; K — коэффициент обтекаемости; F — лобовая площадь автомобиля; v_a — скорость движения автомобиля.

В соответствии с понятием энергетического КПД энергия, определяемая величиной нагрузки на рабочем органе (в данной случае — ведущие колеса автомобиля), определяется как:

$$W_{пол} = 10^{-3}(mqf + KFv_a^2 + mq\sin\alpha_1)S_1. \qquad (3)$$

Тогда

$$N_{пол} = W_{пол}/(0{,}5T) = 10^{-3}(F_к + F_в + F_i)\frac{0{,}5S}{0{,}5T} =$$
$$= 10^{-3}(F_R + F_в + F_i)v_а.$$

На первом участке машина движется на подъем с постоянной скоростью (установившийся режим движения), т. е. соблюдается условие $\eta_э = \eta_н = 0{,}65$, т. е. энергетический КПД равен механическому КПД.

В соответствии с условием (2) и зависимостью (1) суммарные затраты энергии на первом участке будут: $W = W_{пол}/\eta_э = W_{пол}/0{,}65$.

Участок 2. На данном участке автомобиль движется под уклон без нагрузки на ведущие колеса (электродвигатель не потребляет энергии), так как силы сопротивления качению, сопротивления воздуха и сила $F_{с.т}$ сопротивления прокручиванию трансмиссии автомобиля компенсируются движущей силой вследствие уклона профиля дороги: $F_к + F_в + F_{с.т} - F_i = 0$.

Автомобиль движется с постоянной скоростью, при этом энергоустановка не расходует энергию и сохраняется баланс между полезной энергией, которая обеспечивает движение автомобиля, и непроизводительной энергией, которая препятствует движению. В этом случае математическое выражение энергетического КПД имеет вид:

$$\eta_э = \frac{F_iS_2}{(F_к + F_в + F_{с.т})S_2} = 1.$$

Соответственно: $W_{пол} = 10^{-3}F_iS_2 = 10^{-3}mq\sin\alpha_2S_2$; $N_{пол} = 10^{-3}mq\sin\alpha_2v_а$; $W = (F_к + F_в + F_{с.т})S_2$.

Участок 3. На участке *3* автомобиль движется под уклон. При этом движущая сила вследствие уклона профиля дороги существенно превышает сумму сил естественного торможения автомобиля: $F_i - (F_к + F_в + F_{с.т}) > 0$.

Обозначим выражение в скобках F_Σ — сумма сил естественного торможения автомобиля.

Очевидно, что при условии $F_i > F_\Sigma$ автомобиль начнет двигаться с ускорением, и для сохранения заданной скорости движения необходимо прибегнуть к его искусственному торможению, что рациональнее всего выполнить путем включения двигателя в генераторный режим работы, который обеспечит рекуперацию избыточной энергии в аккумулятор.

Допустим, что движущая сила из-за уклона дороги превышает сумму сил естественного торможения автомобиля на 20 %: $F_i = 1{,}2F_\Sigma$.

Следовательно, энергетический КПД на участке *3* будет: $\eta_э = F_iS_3/(F_\Sigma S_3) = 1{,}2F_\Sigma/F_\Sigma = 1{,}2$.

Тогда:

$$W_{пол} = 10^{-3}F_iS_2 = 10^{-3}mq\sin\alpha_3S_3;$$
$$N_{пол} = 10^{-3}mq\sin\alpha_3v_а;\ W = (F_к + F_в + F_{с.т})S_3.$$

Участок 4. Участок *4* подобен участку *2*: $\eta_э = 1$.

Участок 5. Автомобиль движется с постоянной скоростью по горизонтальному участку, следовательно:

$$P_к = F_к + F_в;$$

$$W_{пол} = 10^{-3}(mqf + KFv_а^2)S_5;$$

$$N_{пол} = W_{пол}/(0{,}125T) = 10^{-3}(mqf + KFv_а^2)v_а;$$

$$\eta_э = \eta_н = 0{,}65;$$

$$W = W_{пол}/\eta_э = W_{пол}/0{,}65.$$

Найдем среднее значение энергетического КПД автомобиля за время T, в течение которого он преодолел путь S со средней скоростью $v_а$:

$$\eta_{эT} = (0{,}65\cdot 0{,}5T + 1\cdot 0{,}125T + 1{,}2\cdot 0{,}125T +$$
$$+ 1\cdot 0{,}125T + 0{,}65\cdot 0{,}125T)/T = 0{,}806.$$

На основании приведенных выше зависимостей можно вычислить полезные $W_{полT}$ и непроизводительные $W_{непрT}$ затраты энергии за время T движения автомобиля на участке S.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров И. К.** Энергетический анализ и пути снижения энергоемкости машинных агрегатов (на примере сельскохозяйственных машин). Вологда: Северо-Двинское отделение Инженерной академии РФ, 1993. 198 с.
2. **Александров И. К.** Энергетический анализ и пути снижения энергоемкости машинных агрегатов. Вологда: Северо-Двинское отделение Инженерной академии РФ, 1993. 198 с.
3. **Александров И. К.** Совершенствование сельскохозяйственных машин и агрегатов на основе энергетического анализа: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПГАУ, 1993. 414 с.
4. **Александров И. К.** К вопросу энергосбережения в машинных агрегатах // Вестник машиностроения. 1995. № 2. С. 23—27.
5. **Александров И. К.** Адаптивные трансмиссии — путь к созданию экономичных АТС // Автомобильная промышленность. 1996. № 2.
6. **Александров И. К.** Адаптивные трансмиссии и топливная экономичность АТС // Автомобильная промышленность. 2005. № 7.
7. **Пат. 2070649 C1 РФ:** МКИ 6F02D 45/00, B60K 41/16. Способ стабилизации минимального расхода топлива двигателем внутреннего сгорания и устройство для его осуществления.
8. **Александров И. К.** Основные положения энергетического анализа машин: Учеб. пособ. Вологда: ВоПИ, 1999. 73 с.

Цикл статей
"Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки"
(под общей редакцией академика Российской академии космонавтики и Российской инженерной академии, д-ра техн. наук Ю. Н. Дроздова)

УДК 621.89

В. И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН, д-р техн. наук, А. П. СЫЧЕВ, канд. физ.-мат. наук (Ростовский ГУПС), В. П. СЕРГИЕНКО, канд. техн. наук, А. В. КУПРЕЕВ (Ин-т механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель)

Тепловые эффекты и структурные изменения материалов в маслоохлаждаемых фрикционных парах трения

Рассмотрены актуальные проблемы трения фрикционных материалов в среде масла, приведены примеры результатов фундаментальных исследований и практических разработок фрикционных материалов, предназначенных для работы в условиях трения со смазкой. Проанализированы механизмы изнашивания и структурные изменения в трущихся материалах, а также явления массо- и теплопереноса в зоне трения фрикционных материалов. Показано, что уровень фрикционного тепловыделения в парах трения, несмотря на уменьшение величины средней удельной силы трения, существенно зависит от наличия стабильной пленки и интенсивности теплообмена на фрикционном контакте.

Pressing problems of frictional materials operating in oil are considered. Some results of fundamental and applied investigations of frictional materials intended for lubricated friction are given. Wear mechanisms and structural variations in the rubbing materials are analysed, along with mass and heat transfer phenomena in the friction zone. It is shown that the degree of friction-induced heat isolation in a friction pair essentially depends on the presence of a sustainable film and heat exchange intensity in the friction contact despite the average specific friction force value decrease.

Введение. Одним из актуальных объектов исследований в современном машиностроении, триботехнике и материаловедении являются фрикционные материалы (ФМ). Цель этих исследований заключается в создании искусственных материалов, обладающих высокой способностью к диссипации механической энергии. Механизм диссипации характеризуется преобразованием кинетической энергии в теплоту трения и ее рассеяния в окружающую среду [1]. С помощью ФМ в технике решается и обратная задача — передача механической энергии от источника к исполнительным механизмам.

Фрикционные материалы применяются преимущественно в тормозных устройствах и трансмиссиях [2]. Увеличение мощности фрикционных систем современных мобильных машин привело к созданию новых конструкций фрикционных узлов, в которых диссипационные процессы происходят в жидкостной среде, преимущественно в масле. Основные требования к ФМ, работающим в среде масла, заключаются в снижении теплонагруженности фрикционных пар трения и, как следствие, интенсивности изнашивания и коробления трущихся деталей, а также в предотвращении возникновения ударных нагрузок в агрегатах трансмиссии и тормозных механизмах [3, 4]. Сухое трение ФМ (без смазочного материала) заменяется жидкостным или граничным. Принудительный отвод теплоты из зоны трения позволяет существенно повысить мощность, долговечность и надежность работы фрикционных узлов машин. Неизбежное при этом снижение силы трения компенсируется увеличением числа трущихся пар [5].

Плавность включения трансмиссий и тормозных механизмов обеспечивается путем уменьшения разницы между коэффициентами статического ($\mu_{стат}$) и динамического ($\mu_{дин}$) трения материалов. Особенностью фрикционного взаимодействия в масле является ослабление объемных свойств смазочного материала и заметное влияние на триботехнические параметры пары трения свойств контактных поверхностей трущихся материалов [6, 7]. Проблема повышения надежности и долговечности маслоохлаждаемых фрикционных узлов (МФУ) требует решения задачи создания устойчивой масляной пленки на фрикционном контакте, поэтому исследования триботехнических явлений на контактных поверхностях трущихся твердых тел в маслоохлаждаемых парах трения, особенно при переходных режимах трения, являются актуальными [8]. Несмотря на постоянное совершенствование компонентного состава, свойств ФМ и конструкций МФУ, задача улучшения эффективности работы и снижения ударных нагрузок в узлах трения машин при переходных процессах не решена до настоящего времени [9].

Цель данной работы — исследование тепловых процессов и структурных изменений на контактных поверхностях маслоохлаждаемых фрикционных пар трения, преимущественно при переходе от жидкостного режима к режиму трения без смазочного материала.

Для более адекватного описания процессов, происходящих на реальном фрикционном маслоохлаждаемом контакте, в качестве объектов исследований были выбраны фрикционные пары трения многодискового маслоохлаждаемого тормоза (ММОТ) (рис. 1) гидромеханической коробки перемены передач (ГМКПП) большегрузных карьерных самосвалов грузоподъемностью 75 т и колесных тракторов мощностью 156 кВт.

Использованные в работе ФМ с полимерной матрицей — совместная разработка Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Бела-

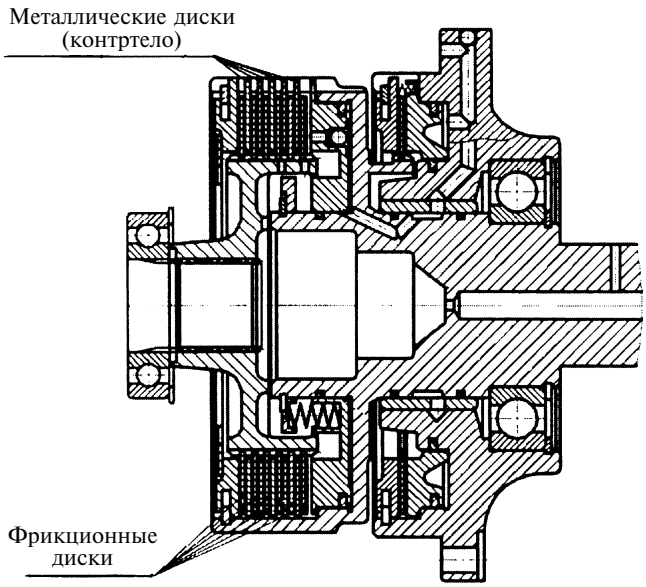


Рис. 1. Общий вид многодискового маслоохлаждаемого тормозного механизма

руси и Ростовского государственного университета путей сообщения [10].

Образцы вещества, адсорбированного на контактных поверхностях фрикционных дисков при высокотемпературном трении, изучали методами термогравиметрии и пиролизной газовой хроматографии. Микрорельеф пар трения исследовали с помощью профилографа Taylor Hobson (Англия). Микротвердость определяли на микротвердомере Leica VMHT MOT. Для изучения морфологии поверхности трения использовали оптический микроскоп Leica MEF4A (Австрия) и растровый электронный микроскоп Jeol (Япония). Фрикционно-износные характеристики определяли на машине трения СМЦ-2 по схеме "вал — частичный вкладыш" и на инерционных стендах для испытания тормозных механизмов, установленных на заводе "БелАЗ". Испытания проводили при температуре 295 ± 2 К на воздухе в условиях трения без смазочного материала и в среде минерального масла SAE 15 W40. Моделирование температурных полей в парах трения проводили численно с использованием метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего учесть нелинейность теплофизических свойств материалов и геометрические особенности исследуемых объектов [11].

Обсуждение проблемы и результаты исследований. Как свидетельствуют данные, приведенные в таблице, к настоящему времени в МФУ используются пять классов материалов: металлокерамические, прессованные композиты с органической матрицей, углеродные, листовые (фрикционная бумага) и металлические фрикционные покрытия [12]. Для каждого класса ФМ разработано огромное количество рецептур, соответствующих конкретным требованиям и условиям эксплуатации. Тепловой режим работы пары трения, являющийся основным критерием выбора того или иного класса ФМ при трении в режиме без смазочного материала [1], не является определяющим для ФМ, предназначенных для трения в масле, поскольку температура эксплуатации таких материалов ограничена термостойкостью масла. Не является критичным параметром и износ фрикционно взаимодействующих твердых тел, поскольку жидкостное трение не вызывает интенсивного изнашивания трущихся поверхностей. Эффективность маслоохлаждаемых фрикционных узлов во многом определяется структурой материалов и геометрией поверхности трения [13], а также маркой смазочного материала, его реологическими характеристиками и скоростью прокачки масла через объем, ограничивающий многодисковые пары трения. В значительной степени от указанных параметров смазочного материала зависят спеченные, дисперсионно спеченные, молибденовые, углеродные материалы, а также фрикционная бумага. Менее чувствительны к свойствам масла и интенсивности теплоотвода из зоны трения металлокерамические

Сравнительные триботехнические характеристики фрикционных материалов, предназначенных для работы в среде масла

Тип фрикционного материала	Триботехнические характеристики		
	Коэффициент трения		Удельная энергия трения, МДж/м^2
	$\mu_{дин}$	$\mu_{стат}$	
ФМ с органической матрицей, армированные углеродными и графитовыми волокнами	0,10÷0,16	0,08÷0,14	0,90÷1,76
Безасбестовые ФМ, армированные волокнами целлюлозы и кевлара	0,10÷0,15	0,12÷0,16	0,45÷0,60
Безасбестовые ФМ с органической матрицей и графитовым наполнителем	0,08÷0,11	0,09÷0,12	0,3÷0,25
Молибденовые фрикционные накладки	0,08÷0,12	0,08÷0,14	1,0÷2,6
Многослойные углеродные ФМ	0,10÷0,12	0,10÷0,12	0,46÷2,0
Базальтонаполненные ФМ с полимерной матрицей	0,11÷0,14	0,12÷0,16	0,9÷1,9
Листовые бумажные ФМ:			
наполненные углеродом	0,11÷0,14	0,15÷0,19	2,1÷2,5
эластичные	0,11÷0,14	0,16÷0,20	1,6÷2,5
наполненные волокном кевлар	0,11÷0,15	0,15÷0,18	1,0÷2,1
Металлокерамика на основе бронзы	0,075÷0,123	0,08÷0,14	0,94÷1,14
Дисперсионно спеченные ФМ (латунно-бронзовая основа)	0,09÷0,12	0,10÷0,14	0,94÷2,0
Металлокерамика на основе железа	0,05÷0,14	0,09÷0,18	2,15÷2,40

материалы на основе железа и прессованные фрикционные композиты с полимерной матрицей [12].

В транспортной и машиностроительной индустрии наибольший опыт в применении и эксплуатации материалов в маслоохлаждаемых узлах трения накоплен для металлокерамических фрикционных деталей. Достоинства этих материалов заключаются в высокой удельной мощности трения, теплопроводности и износостойкости при повышенной удельной работе трения. Удельная мощность трения металлокерамических фрикционных материалов на основе железа, предназначенных для эксплуатации в среде масла, составляет 0,9÷4,0 МВт/м^2, допустимая скорость скольжения — до 80 м/с. Новые материалы на меднографитовой основе обеспечивают эффективность фрикционного взаимодействия при удельной мощности трения до 6 МВт/м^2, в режиме торможения удельная работа трения достигает 8,5 МДж/м^2. Для сравнения рекомендуемая удельная мощность трения фрикционных бумажных материалов составляет от 0,85 до 1,45 МВт/м^2, материалов на графитовой основе — 0,5÷1,5 МВт/м^2, максимальная эффективная скорость скольжения — 30÷42 м/с. Однако металлокерамические фрикционные материалы при эксплуатации в масле имеют существенный недостаток — они не обеспечивают стабильность момента трения и плавность включения узлов трения, вследствие чего ухудшается динамика переходных процессов в машинах. Немаловажным фактором является увеличенная виброакустическая активность таких материалов. Повышенный уровень шума в агрегатах трансмиссий и тормозных механизмов является трудно устранимым триботехническим эффектом, снижающим субъективное восприятие качества машины [14, 15].

Решению перечисленных выше проблем способствуют материалы с улучшенными демпфирующими свойствами, например фрикционные материалы с полимерной матрицей. Основная задача заключается в создании высокопрочной термостойкой полимерной структуры ФМ, обеспечивающей жидкостный или граничный режим трения фрикционно взаимодействующих твердых тел с наименьшей разницей между коэффициентами статического и динамического трения независимо от вязкости смазочного материала. В работах [13, 16] приведено описание разработанных полимерных фрикционных материалов с микропористой и ортогонально-армированной искусственными минеральными волокнами структурой, улучшающих акустические параметры фрикционных узлов и снижающих вероятность срыва масляной пленки на контактной поверхности при переходе к режиму трения без смазки.

Фрикционный материал оказывает влияние на величину коэффициента трения через процесс пластической деформации микровыступов и динамического выдавливания смазочных слоев из зоны трения при приложении нормальной и касательной нагрузок, т. е. чем больше тангенциальное смещение в трибосистеме перед началом скольжения, тем ближе значения коэффициентов динамического и статического трения. Механизм возникновения ударных нагрузок при трении жестких и высокомодульных материалов заключается в уменьшении тангенциального смещения фрикционных

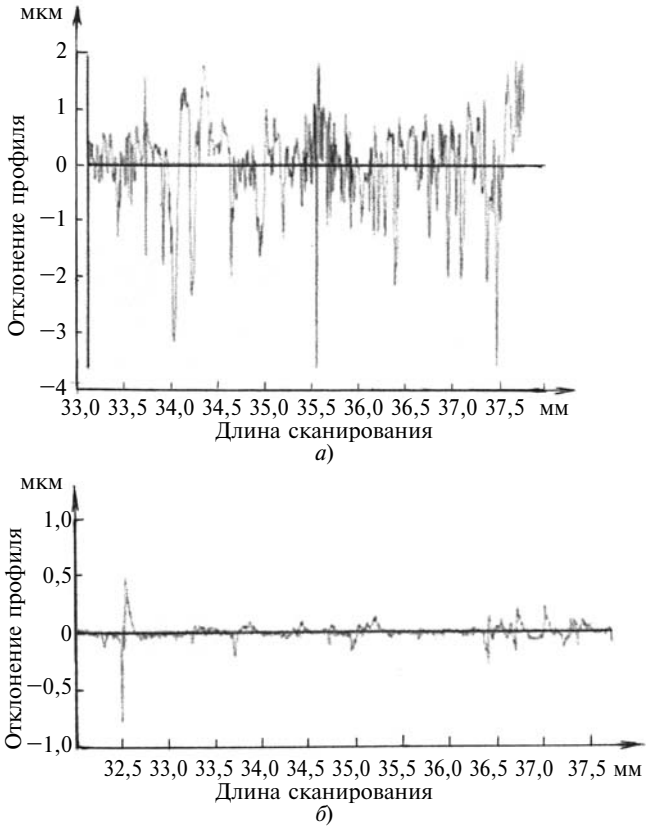


Рис. 2. Шероховатость металлического диска контртела:
а — исходная: Ra = 0,5600 мкм, Rz = 4,1722 мкм; *б* — после наработки 2000 циклов торможений на стенде: Ra = 0,0624 мкм, Rz = 0,4085 мкм

дисков, достигаемом перед началом или на конечной стадии скольжения при одновременном приложении нормального и касательного усилий к паре трения, в результате чего возникает скачок силы трения скольжения [17]. Доказательством деформационных процессов, происходящих на микрорельефе поверхности трения, может быть обнаруженное нами уменьшение шероховатости поверхности трения металлических дисков контртел в МФУ мобильных машин. После наработки 2000 циклов торможений на стенде для испытаний тормозных механизмов в среде минерального масла с удельной работой трения 0,9 МДж/м^2 параметр Ra шероховатости металлических дисков уменьшился по в 8÷10 раз (рис. 2).

Из фотографий, представленных на рис. 3, видно, что структуры контактной поверхности ФМ при трении без смазочного материала (рис. 3, *а*) и при трении в минеральном масле (рис. 3, *б*, *в*) существенно отличаются,

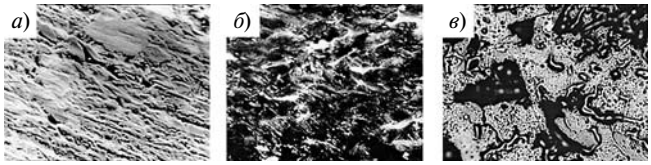


Рис. 3. Поверхности трения ФМ после абразивного (*а*) и эрозионного (*б*) изнашивания (× 500), поверхность трения с адсорбированным полимолекулярным слоем масла (*в*) (× 200)

а следовательно, отличаются и механизмы изнашивания ФМ. На поверхности трения маслоохлаждаемых деталей адсорбируется устойчивый полимолекулярный слой смазки (см. рис. 3, *в*). Установленный нами механизм образования и стабилизации полимолекулярного слоя заключается в физической адсорбции смазочного материала открытопористой структурой ФМ. Удерживанию масляной пленки способствует не только микропористая структура материала, но и высокая исходная шероховатость поверхности трения. Абразивное изнашивание ФМ, характерное для режима трения без смазочного материала (см. рис. 3, *а*) переходит к другим видам изнашивания. Например, при жидкостном трении в МФУ может возникать эрозионное (см. рис. 3, *б*), или комбинированное — эрозионно-кавитационное изнашивание, поскольку в смазке присутствуют как абразивные частицы износа, так и пузырьки пара и растворенных газов, образующихся вследствие быстрого перемещения твердой поверхности фрикционных дисков в жидкой среде.

Срыв масляной пленки приводит к возникновению участков сухого трения и, как следствие, к снижению охлаждающего действия масла и интенсификации процессов теплообразования. Результаты численного моделирования температурных полей на контактной поверхности ФМ тормозного диска ММОТ колесного трактора для случая срыва масляной пленки приведены на рис. 4. Температурные поля в элементах пары трения находили из решения уравнения теплопроводности при граничных условиях II рода [1]. В расчетах предполагалось, что диссипируемая парой трения тормозной системы трактора мощностью 156 кВт энергия составляет 350 кДж, время торможения — 3,5 с. При однократном торможении расчетная температура трения достигает максимальных значений ≈ 700 К на второй секунде торможения, при этом зона температурного максимума локализуется в периферийной области тормозного диска по его ширине, а поверхностные температуры превышают термостойкость масла и близки к температуре структурных превращений металлических дисков (контртел). Температура трения становится критическим фактором, определяющим эффективность и долговечность фрикционного узла трения.

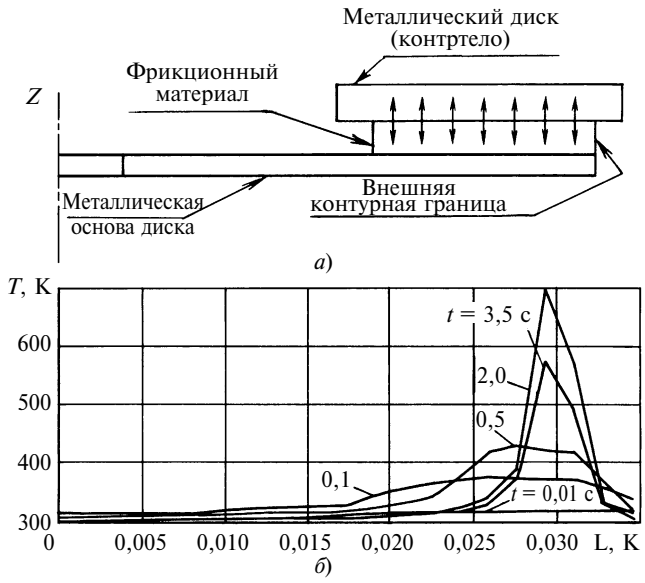


Рис. 4. Модель пары трения дискового тормозного механизма (*а*) и радиальное распределение температур по ширине *L* фрикционной накладки для различного времени *t* торможения в режиме трения без смазочного материала (общее время торможения — 3,5 с) (*б*): q_1, q_2 — тепловые потоки

При переходных режимах трения в результате интенсивного теплообразования на фрикционном контакте мы наблюдали потерю эффективности ММОТ вследствие образования в адсорбированных граничных слоях пластичных и нерастворимых в масле продуктов — смеси ароматических углеводородов и олефинов. Известно, что такие процессы могут происходить при термодеструкции минерального масла, нагретого свыше 623 К [18]. Имеются также данные, что продукты, являющиеся по своей природе ароматическими углеводородами, могут образовываться вследствие термодеструкции матричного полимера — фенолоформальдегидной смолы, причем их содержание может достигать 30 % от массы смолы в исходном фрикционном материале [19].

Исследования структурных изменений в материале контртела, изготовленного из стали 65Г (ГОСТ 14959—79), показали, что при высокотемпературном трении произошло изменение исходной структуры стали (троостосорбита) с образованием зернистой структуры, сходной со структурой сорбита отпуска, образующейся при нагреве закаленной стали до температуры выше 800 К. Для металлического диска контртела и металлической дисковой основы фрикционного диска обнаружена независимость микротвердости по толщине деталей на глубину, превышающую теплообразующий слой, и статистически значимое снижение микротвердости для материалов пары трения, причем наибольшее разупрочнение претерпели металлические дисковые основы с приформованным ФМ, что позволяет сделать вывод о влиянии условий теплообразования и теплопереноса в паре трения на изменение микроструктуры и свойств материалов трущихся твердых тел. Износостойкость стального диска после высокотемпературного отпуска снизилась на 16÷20 %, материал контртела стал более подверженным температурным деформациям.

Выводы. Исследованиями установлено, что уровень фрикционного тепловыделения в парах трения, несмотря на уменьшение средней удельной силы трения, существенно зависит от наличия стабильной пленки и интенсивности теплообмена на фрикционном контакте. В результате решения тепловой задачи трения скольжения при осесимметричном вращении твердых тел (на примере дисковых тормозных механизмов) для случая срыва масляной пленки между трущимися поверхностями и перехода к режиму трения без смазочного материала теоретически обоснован эффект локализации температурного максимума в зоне, близкой к внешней контурной границе фрикционного слоя на сопрягаемых подвижных деталях. Экспериментально подтверждено, что вследствие повышенного теплообразования при срыве масляной пленки происходит снижение износостойкости и формостабильности металлических

дисков контртел и изменение химического состава матричного полимера и смазочного материала, которые по своим последствиям являются негативными и приводят к необратимому снижению момента трения, а следовательно, к потере эффективности МФУ даже при восстановлении жидкостного режима трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колесников В. И.** Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах. М.: Наука, 2003. 279 с.
2. **Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д.** Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
3. **Мышкин Н. К., Песецкий С. С., Сергиенко В. П.** Состояние и перспективы применения новых полимерных материалов в конструкции тракторов "Беларус" // Материалы междунар. науч.-техн. конф. "Перспективы развития белорусского тракторостроения". Минск: 2006. С. 133—146.
4. **Карьерный** автотранспорт: состояние и перспективы / П. Л. Мариев, А. А. Кулешов, А. Н. Егоров, И. В. Зырянов. СПб.: 2004. 429 с.
5. **Тепловой** расчет многодискового маслоохлаждаемого тормоза / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, М. М. Заболоцкий и др. // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 6. С. 585—592.
6. **Основы** трибологии / Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: 2001. 664 с.
7. **Ахматов А. С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: 1963. 472 с.
8. **Плескачевский Ю. М., Сергиенко В. П.** Фрикционные материалы с полимерной матрицей: перспективы исследований, достигнутый уровень, рынок // Наука и инновации. 2005. № 5 (27). С. 46—53.
9. **Modeling** of Heat Transfer and Fluid Hydrodynamics for a Multidisc Wet Clutch / Y. Yang, R. C. Lam, Y. F. Chen, H. Yabe // SAE Paper 950898 [Electronic resource]. Mode of access: http://www.sae.org/technical/papers/950898
10. **Пат. 2285018 РФ.** Фрикционный материал.
11. **ANSYS** Theory Reference. Ninth Edition SAS IP Inc.
12. **Проспекты фирм:** Horbiger Antriebstechnik GmbH, Germany; Miba Frictec GmbH, Austria; Wellman Products Group, USA; Raybestos Products Company, USA.
13. **The analysis** of triboengineering processes on the frictional oil-cooled contact / V. P. Sergienko, V. V. Zhuk, V. A. Leshchev et al. // Proc. of the 6-th Int. Symp. on tribology of friction materials. Yaroslavl, Russia. 2006. P. 1—5.
14. **Brake Noise,** Vibration and Hardness: Technology Driving Customer Satisfaction [Electronic resource]. Mode of access: http://www.akebonobrakes.com
15. **Vadari V., Albright M., Edgar D.** An Introduction to Brake Noise Engineering. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.sandv.com/home.htm
16. **Sergienko V. P.** Frictional materials with a polymer matrix: research directions and results attained // Tribiologia. 2005. N 5. P. 31—40.
17. **Bo N. J.** Persson. Sliding Friction: Physical Principals and Applications // Springer. 1998. P. 365.
18. **Klamann D.** Lubricants and Related Products. Synthesis, Properties, Applications, International Standards // Verlag Chemie GmbH Publishers. D-6940 Weinheim. 1984. P. 487.
19. **Bark L. S., Moran D., Percival S. J.** Polymer changes during friction material performance // Wear. 41 (1977). P. 309—314.

Металлургическое оборудование и прокатное производство

УДК 621.771:539.3

Б. Н. Поляков, д-р техн. наук (США)

Напряженно-деформированные состояния и оптимальные конструктивные параметры станин заготовочных и листовых прокатных станов

Представлены результаты исследований методом конечных элементов и оптимизации напряженно-деформированных состояний станин заготовочных (блюмингом) и листовых станов и холодной прокатки. Впервые получены численные значения двухосного напряженного и деформированного состояний различных сечений, форма которых максимально приближена к рабочим чертежам, а также установлено влияние различных концентраторов на напряженное состояние станины блюминга. Доказано, что уровень опор ("лап") — конструктивный показатель, существенно влияющий на напряженность и жесткость станин. Предлагаются рациональные соотношения между размерами элементов сечений и уровнем опор. Для заготовочных и листовых станов впервые получены статистически достоверные уравнения множественной регрессии, описывающие зависимости оптимизируемых параметров от конструктивных параметров станины и ее различных несущих сечений, а также результаты их оптимизации.

Results of the final element investigations and of the billet (blooming) and sheet mills and cold rolling stands deflected mode optimization are covered. For the first time numerical values are obtained for biaxial stress and strain states of different sections, the form of which is maximum approximated to working drawings, as well as for the influence of various thickeners on the blooming stand stress state. It is asserted that support level ("lap") is a constructional factor essentially influencing on the stand intensity and rigidity. Reasonable ratio between dimensions of the section elements and support levels are suggested. For the first time statistically reliable multiple regression equations, describing dependences of the optimizing factors on the stand constructional factors and its various supporting sections, as well as optimization results are obtained.

Современная научная методология и информационные технологии, такие как программные системы трехмерного твердотельного моделирования, предоставляют широкие возможности для проектирования, совершенствования и оптимизации любых конструкций и деталей сложной конфигурации при высокой точности и достоверности широкого диапазона критериальных функций (заданные надежность и долговечность, материалоемкость и конкурентоспособность и т. п.). Кроме того, предоставляется возможность учитывать и эстетические аспекты визуального восприятия объекта, являющиеся составной частью творческого инженерного

процесса, что в полной мере соответствует концепции "экономики знаний". Докажем вышеприведенный тезис на примере оптимизации конструкций станин — несущих тяжелонагруженных и ответственных деталей рабочих клетей любого прокатного стана, сложных в конструктивном отношении и трудоемких по технологии.

Станина является незаменяемой деталью рабочей клети, поломка которой считается крупнейшей аварией, связанной со значительными простоями и материальными потерями [1]. Поэтому в пределах заданного срока службы должна обеспечиваться абсолютная гарантия прочности станины при различных аварийных ситуациях.

Известны многочисленные случаи поломок станин, имеющих большие запасы прочности, что свидетельствует, прежде всего, о недостатках расчета номинальных напряжений. Поэтому необходимо более точное математическое описание напряженно-деформированного состояния (НДС) станин, учитывающее их конструктивные особенности и концентрацию напряжений. Только при точном обосновании можно снижать массу конструкции и запас прочности, выбирать рациональные конструктивные параметры, обеспечивающие необходимые прочность и жесткость.

Методом конечных элементов (МКЭ) с помощью вычислительной техники исследовались НДС станин блюмингов различных конструктивных исполнений, разработанных на ОАО "Уралмаш" за последние три десятилетия [1, 2].

На рис. 1 представлен чертеж станины закрытого типа современного блюминга.

Для всех станин была принята следующая расчетная схема: на верхнюю поперечину по оси y действует статическое усилие, равное половине усилия прокатки (15 000 кН), равномерно распределенное по площади, равной контактной поверхности нажимной гайки и станины; на нижнюю поперечину по оси y действует то же усилие, но равномерно распределенное по контактной поверхности подушки нижнего валка с поперечиной.

В предположении об абсолютной жесткости плитовин приняты следующие кинематические граничные условия: перемещения плоскости опоры станины ("лап") относительно плитовин по осям x и y равны нулю.

Решая задачу определения НДС станины клети трио стана 2300 Ашинского металлургического завода, установили [2], что перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости станины, практически равны нулю. Это позволило расчетную схему станины представить как плоскую односвязную область, а с учетом симметрии детали, нагрузок и граничных условий относительно оси y рассчитывать лишь одну половину области. Расчет НДС выполнялся по схеме плоского деформированного состояния (ПДС). Сложная и объемная конфигурация сечений учитывалась введением в матрицу жесткости переменной толщины элементов.

Выло принято, что материал — изотропный и однородный, с модулем упругости первого рода, равным $1{,}75 \cdot 10^5$ МПа, и коэффициентом Пуассона, равным 0,3. Влияние температуры на НДС и упругие постоянные материала не учитывалось.

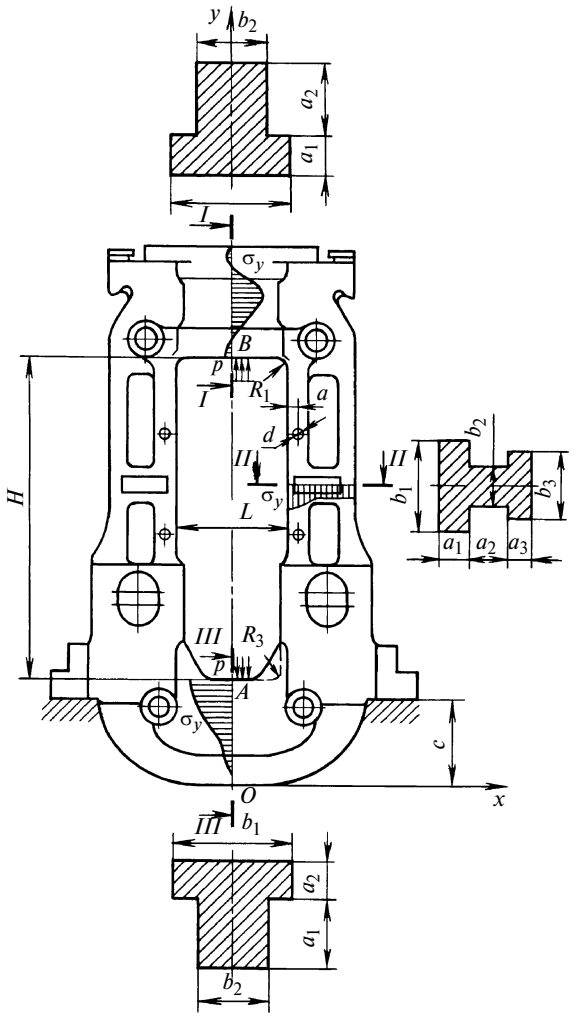


Рис. 1. Станина блюминга с эпюрами напряжений $\sigma_{экв}$ в главных сечениях, конструктивные параметры концентраторов напряжений, формы и параметры сечений, принятые для расчетного эксперимента

Погрешность расчетов оценивалась в 5 % выполнения статических граничных условий при измельчении сетки конечных элементов.

Результаты расчетов НДС станин, а именно значения напряжений σ_x, σ_y, τ_{xy} в главных сечениях, эквивалентного напряжения $\sigma_{экв}$ и перемещений u_x, u_y, обусловленных деформированным состоянием наиболее нагруженных и конструктивно сложных сечений, подробно представлены в работе [2] и частично показаны на рис. 1. Эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$ рассчитывались по энергетической теории прочности твердых тел как наиболее полно учитывающей все компоненты тензора напряжений.

Для всех станин характер напряженного состояния разных сечений соответствует результатам, полученным расчетными или аналитическими методами. Для верхней и нижней поперечин (см. рис. 1, сечения *I—I* и *III—III*) имеет место знакопеременный изгиб по оси x с напряжениями сжатия и растяжения и изгиб по оси y только с напряжениями сжатия, которые изменяются от нуля до максимальной величины, определяемой граничны-

ми условиями. Нейтральные оси для данных сечений существенно смещены от центра тяжести и приближены к месту приложения нагрузок. Касательные напряжения τ_{xy} малы (максимум 6 % от наибольшего нормального напряжения), и их можно не учитывать.

Напряженное состояние сечений переходов верхней и нижней поперечин в стойки характеризуется как плоское со значительными нормальными растягивающими напряжениями по оси y, уменьшающимися от максимальной величины на внутренней поверхности сечений (со стороны "окна" станины) к наружной свободной поверхности. При этом значения касательных напряжений также максимальны на внутренних поверхностях сечений, приближаются к значениям σ_x и не превышают $\sigma_y/2$.

Напряженное состояние стоек (сечение *II—II*) характеризуется как линейное одноосное: напряжения σ_x и τ_{xy} практически равны нулю. Нормальные напряжения σ_y достигают максимального значения на внутренней поверхности сечения.

Напряженное состояние сечения в области расточки под станинный ролик является также линейным: σ_x и τ_{xy} в 10 раз меньше основного растягивающего напряжения σ_y, которое изменяется нелинейно по сечению и имеет максимальное значение в зоне расточки под станинный ролик.

Результаты исследований деформированного состояния различных станин показали, что в суммарной деформации в вертикальном направлении ("раскрытие поперечин") от 63 до 70 % деформации относится к стойкам, остальная часть деформации равномерно распределяется между поперечинами.

Таким образом, несмотря на то что станины закрытого типа проектировались на протяжении многих десятилетий отечественными и зарубежными конструкторами и, казалось бы, должны уже иметь оптимальные конструктивные параметры, применение современных расчетных методов и средств вычислительной техники, позволивших решать краевые задачи линейной теории упругости для деталей сложной конфигурации с различными граничными условиями, при расчетах НДС станин блюмингов выявило следующие недостатки.

1. Формы различных сечений и размеры их несущих элементов не соответствуют характеру НДС: уровни нормальных (или эквивалентных) напряжений на внутренних слоях сечений (со стороны "окна") в 1,2÷8,6 раза превышают соответствующие уровни напряжений в наружных слоях, при этом изменяются линейно, т. е. отсутствует рациональность (по нагруженности и экономичности расхода материала) в выборе формы сечений, в распределении металла по несущим элементам.

2. Уровень опоры "лап" станин относительно нижнего уровня "окна", имеющий для различных станин значения от 170 до 350 мм, резко занижен. Этот параметр влияет на напряженное состояние нижней поперечины и стоек и особенно на жесткость станины в вертикальной и горизонтальной плоскостях, т. е. уровень "лап" — очень важный конструктивный параметр по его влиянию на несущую способность и жесткость станины. Данную особенность граничных условий ранее невозможно было учесть при численных и тем более при аналитических методах исследования.

Обобщение опыта проектирования станин блюмингов с использованием информационных технологий, оптимизация и параметрический анализ (некоторые будут приведены ниже) позволили решить конкретную задачу синтеза при разработке трех типоразмеров унифицированных станин реконструируемых блюмингов с унифицированным оборудованием участка рабочей клети.

Унифицированные станины всех типоразмеров имеют одинаковые конфигурации и равные площади соответствующих сечений, отличаются только высотой "окна" и общей высотой детали. При проектных расчетах НДС принимались та же расчетная схема и те же граничные условия, которые приведены в работе [2].

Картина НДС унифицированных станин аналогична НДС исследованных станин, но значения напряжений и деформаций унифицированных станин несколько меньше. Значения показателей НДС и жесткости станин различных конструкций приведены в таблице. Их анализ показал, что унифицированные станины при меньших эквивалентных напряжениях обладают большей жесткостью.

В настоящее время унифицированные станины установлены на девяти реконструированных блюмингах Криворожского, Магнитогорского, Челябинского, Западно-Сибирского, Череповецкого, Орско-Халиловского металлургических комбинатов (МК).

Значения некоторых показателей НДС и жесткость станин различных конструкций при нагрузке 15 000 кН

Блюминг, объект, установка (страна), станина	Сечение (см. рис. 1)						Раскрытие поперечин, мм	Жесткость, кН/мм	Сближение стоек, мм
	I—I		*II—II*		*III—III*				
	$\sigma_{экв}$, МПа	u_y, мм	$\sigma_{экв}$, МПа	u_y, мм	$\sigma_{экв}$, МПа	u_y, мм			
1150, Череповецкий МК	37,7	0,71	22,2	0,12	43,2	−0,43	1,14	13 160	0,58
1300, Челябинский МК	25,5	0,80	19,9	0,20	39,9	−0,34	1,14	13 160	0,66
1300, Западно-Сибирский МК	33,4	0,65	29,0	0,18	27,,3	−0,28	0,93	16 120	0,38
1500, Нижне-Тагильский МК	27,1	0,66	18,7	0,14	20,4	−0,26	0,92	16 300	0,40
1250 (Польша, г. Катовице)	30,3	0,76	20,9	0,22	23,8	−0,23	0,99	15 150	0,42
1250 (Болгария, г. Кремиковцы)	32,3	0,73	19,0	0,23	23,4	−0,23	0,96	15 630	0,44
Унифицированная станина 1	32,9	0,58	18,4	0,24	22,5	−0,26	0,84	17 860	0,44
Унифицированная станина 2	32,2	0,52	16,9	0,24	22,5	−0,26	0,78	19 230	0,40
Унифицированная станина 3	32,1	0,50	17,0	0,25	22,5	−0,26	0,76	19 740	0,38

Следует отметить, что унифицированные станины можно назвать изящными и красивыми. Это указывает на определенную гармонию в конструкции.

Решение краевых задач с применением МКЭ использовалось для оценки влияния конструктивных параметров различных концентраторов на напряженное состояние станин блюмингов и других заготовочных станов с отношением высоты "окна" к его ширине, равным 3:4. Были исследованы зоны концентрации в областях переходов верхней поперечины в стойку (галтель R_1), стойки в нижнюю поперечину (галтель R_3) и в зоне отверстия под прижимные планки (см. рис. 1). Расчетная схема и граничные условия аналогичны применяемым при исследованиях НДС станин. Достоверность результатов обеспечивалась минимальными линейными размерами треугольных симплекс-элементов (2,0÷5,0 мм) и насыщением функции числом узлов с отклонением не более 2÷3 % при погрешности статических граничных условий не более 5 %. Результаты исследований подробно отражены в работе [2] и на рис. 2, 3.

Сравнение значений максимальных напряжений с напряжениями, полученными по результатам исследований НДС станин без учета концентрации, позволило определить теоретические коэффициенты α_σ концентрации напряжений в зонах максимальных напряжений в сечениях "брутто": для галтели R_1 — 4,1÷4,3; для галтели R_3 — 3,6÷3,8; для области отверстия — 2,8÷3,0.

По результатам исследований были сделаны следующие выводы (см. рис. 2).

1. Наиболее опасной зоной концентрации напряжений в станине (без учета концентрации в зоне расточки под нажимную гайку, так как в этом случае будет решаться объемная задача) является область галтели радиусом R_1, поэтому следует принимать максимальное значение R_1, но не менее 150÷200 мм.

2. Оптимальное значение соотношения конструктивных параметров отверстия (d/a) под прижимные планки, обеспечивающие напряжение 30÷40 МПа, находится в диапазоне от 0,35 до 0,9.

Выбирать конструктивные параметры и оценивать напряжения в станинах блюмингов и обжимных клетей заготовочных станов следует с учетом зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3.

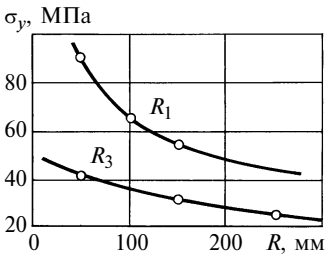


Рис. 2. Зависимости изменений максимальных напряжений от радиусов R_1 и R_3 галтелей

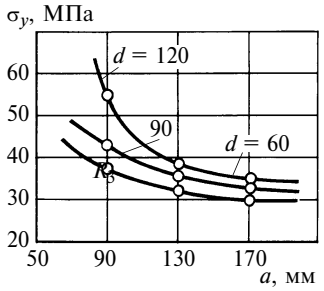


Рис. 3. Зависимости изменений максимальных напряжений σ_y в области отверстия от расстояния *a* при различных диаметрах отверстия

Выше приведены примеры применения расчетных методов анализа и поиска оптимальной конфигурации детали, но возможно и технологическое решение.

Исследуем влияние неоднородности (несплошности) металла на деформированное состояние станин блюмингов. При моделировании введем переменный модуль упругости в функции координат блоков. Решение подобной задачи позволяет обосновать требования к расположению литников, а также определить размеры и число холодильников. Таким образом, на стадии проектирования можно, управляя качеством литья, обеспечить рациональные НДС и несущую способность станин. В частности, было установлено, что при коэффициенте Пуассона от 0,25 до 0,35 жесткость станин не изменяется, а при значении модуля упругости первого рода от $1{,}5 \cdot 10^5$ до $1{,}9 \cdot 10^5$ МПа и при условии его линейного изменения по площади сечения жесткость станин увеличивается не менее чем на 5 % [2]. Поэтому при одинаковой массе и прочих равных условиях сварная станина может иметь бóльшую жесткость, чем литая.

Таким образом, модуль упругости оказывает влияние на деформированное состояние станины, а учет его функционального изменения дает информативные результаты как с технологической точки зрения, так и с позиции управления качеством конструкции при проектировании.

При проектировании станины перед конструктором всегда встает задача достижения ее рациональной металлоемкости, т. е. наиболее обоснованного распределения (использования) металла по объему при обеспечении требуемых прочности, жесткости и долговечности. Ниже приводятся некоторые результаты решения задачи оптимизации станины блюминга [1, 2].

Оптимизация параметров несущих сечений станины закрытого типа выполнялась для станины блюминга 1250 (Польша). Граничные условия принимались по результатам исследований ее НДС. Задача решалась на основании разработанной методологии поэтапной параметрической оптимизации деталей сложных конфигураций [1].

За оптимизируемые параметры были приняты максимальные значения эквивалентных напряжений в нижней ($\sigma_{\text{экв}}^{\text{нп}}$) и верхней ($\sigma_{\text{экв}}^{\text{вп}}$) поперечинах, максимальная величина эквивалентного напряжения в стойке ($\sigma_{\text{экв}}^{\text{ст}}$), а также перемещения по оси y точки A нижней ($\delta_A^{\text{нп}}$) и точки B верхней ($\delta_B^{\text{вп}}$) поперечин, растяжение ($\delta_{\text{ст}}$) стойки и сближение S стоек (суммарная деформация станины по оси x). Факторами, от которых зависят параметры оптимизации, являются размеры несущих элементов сечений a_i, b_i и размер C, характеризующий положение опоры ("лап") станины.

Поскольку число факторов равно 15, а это означает, что проведение полного факторного эксперимента невозможно (32 768 вариантов!), то на серии пробных расчетов было установлено: напряжения в каждом из несущих сечений зависят только от размеров (и их соотношений) данного сечения и практически не зависят от конфигурации и размеров других сечений [2]. Это уп-

ростило решение поставленной задачи и явилось обоснованием достаточности полного факторного эксперимента по плану 2^7.

Результаты планирования расчетных экспериментов и их статического анализа с оценками точности и надежности подробно приведены в работе [2]. Были получены следующие уравнения множественной регрессии, независимые переменные которых (в действительном масштабе) размещены в последовательности (слева — направо), адекватной снижению их существенности[*1] (значимости):

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{вп}} = 45{,}53 - 11{,}32b_1 - 8{,}72a_1 - 7{,}51a_2 - 2{,}42b_2 - 0{,}94C;$$

$$\delta_B^{\text{вп}} = 1{,}610 - 0{,}415a_2 - 0{,}320b_2 - 0{,}121b_1 - 0{,}175a_1 + 0{,}0{,}012\text{C},$$

где a_1 и a_2 — от 0,64 до 0,96 м[*2], b_1 — от 0,96 до 1,44 м; b_2 — от 0,68 до 1,02 м; C — от 0,90 до 1,59 м;

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 57{,}01 - 15{,}55b_1 - 31{,}30a_1 - 11{,}30a_2 - 12{,}21b_2 - 13{,}44a_3 - 1{,}76C - 6{,}41b_3;$$

$$\delta^{\text{ст}} = 1{,}826 - 1{,}107a_1 - 0{,}320b_1 - 0{,}484b_2 - 0{,}400a_2 - 0{,}467a_3 - 0{,}235b_3 + 0{,}012C;$$

$$\text{S} = -1{,}196 + 0{,}374C + 0{,}347b_1 - 0{,}297b_3 + 0{,}230a_2 + 0{,}267a_1 + 0{,}122a_3 - 0{,}067b_2,$$

где a_1 — от 0,26 до 0,38 м; b_1 — от 0,69 до 1,03 м; a_2 — от 0,27 до 0,41 м; b_2 — от 0,24 до 0,36 м; a_3 —от 0,20 до 0,30 м; b_3 — от 0,27 до 0,39 м;

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{нп}} = 51{,}62 - 17{,}12b_1 - 6{,}04C - 3{,}98a_1 - 4{,}10b_2 - 1{,}53a_2;$$

$$\delta_A^{\text{нп}} = -0{,}707 + 0{,}091C + 0{,}150a_1 + 0{,}089b_1 + 0{,}109a_2 + 0{,}072b_2,$$

где a_1 и a_2 — от 0,60 до 0,90 м; b_1 — от 0,80 до 1,20 м; b_2 — от 0,48 до 0,72 м.

Парные взаимодействия факторов оказались несущественными, они на порядок меньше факторов, влияющих на зависимые переменные [2]. Высокие (близкие к единице) занчения коэффициентов множественной корреляции для всех уравнений регрессии (0,97÷0,988) подтвердили справедливость принятой гипотезы о линейности функций отклика [2].

Анализ и объяснение причин значимости конструктивных параметров, входящих в уравнения регрессии, описывающие НДС станин, обоснование рекомендаций по достижению их рациональной металлоемкости, снижению нагруженности и повышению жесткости даны в работе [2].

Итак, для обеспечения рациональной металлоемкости станины закрытого типа (преимущественно обжимных клетей заготовочных прокатных станов), имеющей сложную конфигурацию сечений стоек и поперечин, а также с целью повышения ее статической прочности и долговечности и увеличения жесткости сечения поперечин и стоек рекомендуется выполнять тавровыми с полками (главными несущими элементами), расположенными со стороны "окна" станины (ближе к контактной поверхности). При этом целесообразно путем выбора размеров несущих элементов обеспечивать наибольший момент сопротивления относительно нейтральной оси сечения (принимая максимальные значения ширины и толщины полки тавра и расстояния от центра тяжести полки до нейтральной оси). Уровень опоры ("лап") станины — важный конструктивный параметр, оптимальное значение которого обеспечивает снижение напряженности нижней поперечины и повышение вертикальной и особенно горизонтальной жесткости станины. Он должен превышать (до определенного предела) нижний уровень "окна" станины или максимально приближаться к нему.

Размеры элементов сечений и уровень "лап" рекомендуется определять из соотношений:

для нижней поперечины

$$b_1/a_1 = 1{,}3—1{,}5,\ b_1/b_2 = 1{,}5—1{,}7,\ a_1/a_2 = 1{,}1—1{,}2;$$

для стойки

$$b_1/a_1 = 1{,}3—1{,}5,\ b_1/b_2 = 2{,}5—3{,}0,\ a_1/a_2 = 0{,}4—0{,}55;$$

для верхней поперечины

$$b_1/a_1 = 1{,}3—1{,}5,\ b_1/b_2 = 1{,}1—1{,}2,\ a_1/a_2 = 1{,}1—1{,}2;$$

для уровня "лап"

$$C/(a_1 + a_2) = 1{,}05—1{,}15.$$

Полученные уравнения регрессии и простые соотношения следует применять для станин, у которых отношение высоты "окна" к ее ширине (H/L) равно 3,7 ± 0,4 [величина допустимого отклонения принята равной максимальной величине доверительного интервала (± 10 %) коэффициентов регрессии приведенных выше уравнений].

Для оценки уровня напряжений и перемещений в заданных сечениях станин с помощью уравнений регрессии при нагрузке, отличной от принятой, можно использовать известные из линейной теории упругости соотношения [2].

Полученные уравнения регрессии, рекомендации по форме несущих сечений и приведенные выше рациональные соотношения между их конструктивными параметрами были успешно применены при проектировании трех типоразмеров унифицированных станин

[*1] Существенность и рандомизацию факторов устанавливали по абсолютным величинам коэффициентов частной корреляции, что методологически правильно, так как при планировании экспериментов получаются широкие доверительные интервалы для коэффициентов регрессии и поэтому величины последних могут составлять 10 % и более от абсолютной величины наибольшего коэффициента, но при этом быть незначимыми.

[*2] Здесь и далее указаны нижние и верхние уровни интервалов варьирования при планировании полных факторных экспериментов.

блюмингов, клетей ряда реконструированных заготовочных станов Магнитогорского и Енакиевского металлургических комбинатов (где был значительно повышен уровень "лап"), а также позволили создать станины большей жесткости для среднелистового стана 2300 (Болгария) в условиях жестких технологических ограничений на их массу и габаритные размеры, продиктованных производственными возможностями ОАО "Уралмаш".

Подобные уравнения регрессии были получены также при исследовании НДС станин листовых станов горячей и холодной прокатки, у которых отношение H/L изменяется в более широких пределах (2,0÷6,0), при этом размеры "окна" (высота и половина ширины) были введены как варьируемые параметры в уравнения регрессии, что увеличило диапазон возможностей решаемых задач оптимизации [2].

Для максимальных эквивалентных напряжений в нижней поперечине, стойке и верхней поперечине получены следующие уравнения регрессии:

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{нп}} = 57{,}546 - 18{,}904b_1 - 15{,}327C - 12{,}985L - 7{,}507b_2 - 7{,}438a_2 - 7{,}007a_1 + 0{,}088H,$$

где a_1 и a_2 — от 0,56 до 0,94 м, b_1 и b_2 — от 0,51 до 1,19 м;

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{ст}} = 55{,}752 - 31{,}585a_1 - 27{,}136a_2 - 15{,}964b_1 - 7{,}820b_2 + 3{,}058C + 2{,}460L - 0{,}147H,$$

где a_1 и a_2 — от 0,21 до 0,49 м, b_1 — от 0,48 до 1,12 м; b_2 — от 0,36 до 0,84 м;

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{вп}} = 76{,}656 - 32{,}134b_1 - 16{,}454a_1 - 16{,}454a_2 + 12{,}338L - 3{,}577b_2 - 0{,}862C + 0{,}196H,$$

где a_1 и a_2 — от 0,60 до 1,00 м, b_1 и b_2 — от 0,51 до 1,19 м.

Для перемещения точки A (см. рис. 1) нижней поперечины, сближения стоек S и перемещения точки B верхней поперечины получены следующие уравнения регрессии:

$$\delta_A = -0{,}479 + 0{,}190a_1 - 0{,}194a_2 + 0{,}190b_1 + 0{,}064b_2 + 0{,}033C - 0{,}315L - 0{,}001H;$$

$$S = -0{,}835 + 0{,}774a_1 + 0{,}786a_2 + 0{,}564b_1 + 0{,}406b_2 + 0{,}218C - 0{,}586L - 0{,}153H;$$

$$\delta_B = 2{,}278 - 0{,}892a_1 - 0{,}802a_2 - 0{,}671b_1 - 0{,}277b_2 - 0{,}044C + 0{,}348L + 0{,}103H,$$

где C — от 0,68 до 1,12 м; L — от 0,6 до 1,0 м; H — от 4,32 до 7,18 м.

Уравнения регрессии для НДС станин листовых станов [2] позволили обосновать принципиальные положения по рациональной (с позиций прочности и жесткости) форме несущих сечений (а именно тавровой) и значимости уровня опор.

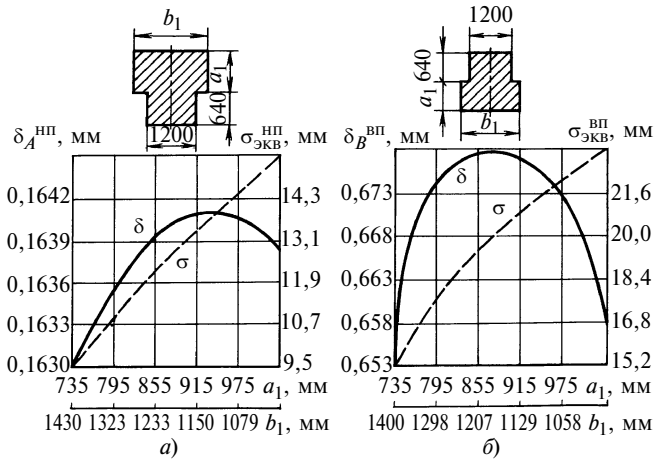


Рис. 4. Зависимости изменений эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ и перемещений (δ_A, δ_B) в нижней (*а*) и верхней (*б*) поперечинах станины блюминга и листового стана горячей прокатки от размеров элементов сечений при сохранении их площадей

Полученные уравнения регрессии для оптимизируемых параметров представляют собой целевые функции линейной формы, а диапазоны значений переменных, приведенных для каждого сечения, можно представить как систему линейных ограничений, при этом искомые величины $x_i \geqslant 0$. Следовательно, решение задачи поиска экстремума целевых функций относится к области линейного программирования. Поиск оптимальных форм и конструктивных параметров несущих сечений станин блюмингов и листовых станов горячей прокатки реализован на основании симплекс-метода, результаты приведены в работах [1, 2]. На рис. 4 в качестве примеров показаны зависимости изменений эквивалентных напряжений и перемещений в поперечинах станины блюминга и листового стана горячей прокатки от размеров элементов сечений при сохранении их площадей.

Оптимизация станин блюмингов, непрерывно-заготовочных и листовых станов путем нахождения рациональных форм и размеров несущих сечений доказала возможность снижения уровня напряжений (в среднем на 10÷15 %) и повышения жесткости (в среднем на 15÷30 %), т. е. увеличения их прочности и долговечности при сохранении той же массы [1, 2]. Полученные уравнения регрессии удобны для расчетов при проектировании и могут быть положены в основу построения параметрических рядов станин заготовочных и листовых станов с различными критериями качества, что дополнит и расширит возможности САПР сложных конструкций, существенно повышая их надежность и долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поляков Б. Н.** Повышение качества технологий и долговечности оборудования прокатных станов. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1993. Ч. 1. 208 с.

2. **Поляков Б. Н., Няшин Ю. И., Волегов И. Ф., Трусов А. Ф.** Нагруженность, несущая способность и долговечность прокатного оборудования. М.: Металлургия, 1990. 320 с.

УДК 621.914.7.001.891.573

А. А. Кутин, д-р техн. наук, В. В. Пирогов, канд. техн. наук (МГТУ "Станкин")

Методы обеспечения требуемой точности обработки сложных деталей с учетом технологических особенностей многокоординатного фрезерования

Представлено создание топологических структур на основе аналитических сплайновых кривых с плавающими областями определения. Предлагается метод расчета траектории движения инструмента с учетом особенностей многокоординатного фрезерования. Разработанные алгоритмы являются основой прикладного программного обеспечения CAD/CAM системы, позволяющей по конструкторской информации автоматизированно программировать обработку сложных деталей на многокоординатных станках с ЧПУ. Новый метод подготовки управляющих программ позволил существенно повысить точность обработки.

Topological structure creation on the base of analytic spline curves with floating definitional domain is covered. Tooling mechanical trajectory calculation procedure is suggested considering multicoordinate milling process features. Developed algorithms are the base for the CAD/CAM applied software system, enabling to programme machining of complex components on multiaxes NC machines by designer's information. The new procedure of control programmes preparation allows for significant increase in working accuracy.

1. Введение

В последнее время существенно возросли возможности вычислительной техники, что позволяет в десятки раз повысить скорость программирования процессов обработки деталей с использованием широко распространенных методов. С другой стороны, широкое внедрение в производство высокоскоростной и многокоординатной обработки требует нового математического обеспечения описания сложных поверхностей деталей. Вместе с этим конструкторы постоянно совершенствуют и усложняют изделия, что создает дополнительные сложности технологам. Эти проблемы невозможно решить с использованием широко распространенных известных алгоритмов.

В качестве примера рассмотрим турбинное колесо, формообразующая поверхность лопатки которого имеет двойную кривизну (рис. 1). Конструкторы с целью увеличения нагнетающей способности колеса удвоили число полных лопаток и, соответственно, число усеченных. При этом уменьшилась толщина лопаток. Реальное время обработки такого колеса должно было удвоиться, на самом деле оно увеличилось почти в 10 раз: раньше на обработку одного канала затрачивали 1 ч, теперь — 6 ч 20 мин. Это обусловлено: 1) использованием инструмента меньшего диаметра, из-за чего рабочую подачу снизили с 200 до 80 мм/мин; 2) введением дополнительных проходов, так как из-за уменьшения толщины лопатки при большом съеме материала возникали большие деформации детали.

Для сокращения времени обработки детали требуется введение высокоскоростного резания и новых технологических методов многокоординатного фрезерования. Данное обстоятельство потребовало разработки новых методов программирования формообразующих движений инструмента для увеличения скорости и точности расчетов.

2. Использование топологических структур при создании математических моделей обработки деталей

Повышение точности и геометрической сложности современных изделий требует новых подходов к разработке математического обеспечения систем программирования обработки деталей на станках с ЧПУ. Расчеты

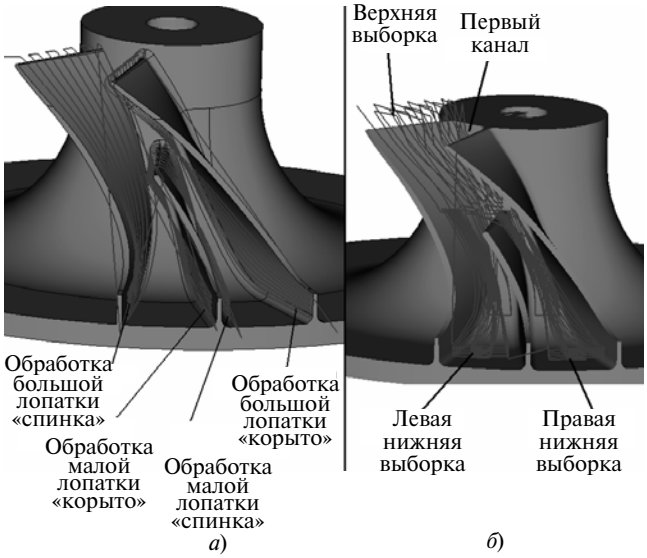


Рис. 1. Турбинное колесо с лопатками первоначальной формы (*а*) и измененными (*б*)

показывают, что при увеличении точности аппроксимации на порядок скорость вычислений уменьшается на два порядка. Для решения данной проблемы, возникающей на этапе моделирования траекторий, необходимы постоянный пересчет модели первого приближения и ее уточнение для пересчета сопрягающего вектора в зависимости от направления инструмента, а время, потребное для такого пересчета, очень велико.

Приведем обобщенную зависимость для определения кривой в виде аналитического сплайна:

$$C(t) = \begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} a_{x0} + \sum\limits_{k=1}^{n_x} \left[a_{xk} \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) + b_{xk} \sin\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) \right]; \\ y(t) = \frac{1}{2} a_{y0} + \sum\limits_{k=1}^{n_y} \left[a_{yk} \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) + b_{yk} \sin\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) \right]; \\ z(t) = \frac{1}{2} a_{z0} + \sum\limits_{k=1}^{n_x} \left[a_{zk} \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) + b_{zk} \sin\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим систему (1) с точки зрения алгоритмического обеспечения функций математической модели. Получив обобщенные зависимости для всех видов кривых, расчетную базу наиболее удобно строить на основе матричных произведений. Определим совокупности коэффициентов, а именно векторы коэффициентов a и b:

$$\begin{cases} a_{c0} = (a_{z0}, a_{y0}, a_{z0}); \\ a_{c1} = (a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}); \\ \ldots \\ a_{cN} = (a_{xN}, a_{yN}, a_{zN}), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} b_{c0} = (0, 0, 0); \\ b_{c1} = (b_{x1}, b_{y1}, b_{z1}); \\ \ldots \\ b_{cN} = (b_{xN}, b_{yN}, b_{zN}). \end{cases} \quad (3)$$

Для выбора значения числа N наиболее логично применить правило наивысшего значащего коэффициента:

$$N = \max(n_x, n_y, n_z). \quad (4)$$

Исходя из принятых уравнений (2) и (3), на основании системы (1) запишем общую формулу

$$C(t) = \frac{1}{2} a_{c0} + \sum_{k=1}^{N} \left[a_{ck} \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) + b_{ck} \sin\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) \right], \quad (5)$$

где $N = \max(n_x, n_y, n_z)$.

Далее, сформировав матрицы коэффициентов в виде векторов N-го измерения и внеся поправку, которая составляет 1/2, внутрь вектора a_{c0}, определим:

$$\left.\begin{aligned} A_c &= (a_{c1}, a_{c2}, K, a_{cN}); \\ B_c &= (b_{c1}, b_{c2}, K, b_{cN}); \\ a_c &= \left(\frac{1}{2}\alpha_{x0}, \frac{1}{2}\alpha_{y0}, K, \frac{1}{2}\alpha_{z0}\right). \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Для расчетной части зададимся векторами $(N - 1)$ измерения косинусов и синусов:

$$\left.\begin{aligned} C_c &= \left[\cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \cos\left(\frac{4\pi}{T} t\right), K, \cos\left(N \frac{2\pi}{T} t\right)\right]; \\ S_c &= \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right), K, \sin\left(N \frac{2\pi}{T} t\right)\right]. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Из систем (6) и (7) получаем общую математическую структуру вычислений:

$$\overline{C(t)} = \overline{a_c} + \overline{(A_c \cdot C_c)} + \overline{(B_c \cdot S_c)}. \quad (8)$$

Определив равенство (8) как математическое основание для вычисления геометрических параметров кривых по всей модели детали, можно получить все расчетные алгоритмы по всем элементам в параллельном режиме. Далее, формируя векторные матрицы C_c и S_c, используя их скалярное произведение с векторными матрицами A_c и B_c и делая поправку на вектор $\overline{a_c}$, можно проводить расчеты на всех ребрах внутри цикла и на всех циклах одновременно. Такой режим вычислений позволяет сократить число повторяющихся операций до наименьшего для однотипных ребер в модели детали. В результате время расчета сократится приблизительно в 5,5 раза. Это связано с процессом подготовки вычислительных структур A_c и B_c для кривых.

Аналогично для поверхности, основанной на u и v кривых, можно представить следующие уравнения расчета:

$$S(u, v) = \begin{cases} x(u, v) = \frac{1}{2}[a_{x0} + \tau v(c_{x0} - a_{x0})] + \\ + \sum\limits_{k=1}^{n} \left\{ [a_{xk} + \tau v(c_{xk} - a_{xk})] \cos\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) + \right. \\ \left. + [b_{xk} + \tau v(d_{xk} - b_{xk})] \sin\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) \right\}; \\ y(u, v) = \frac{1}{2}[a_{y0} + \tau v(c_{y0} - a_{y0})] + \\ + \sum\limits_{k=1}^{n} \left\{ [a_{yk} + \tau v(c_{yk} - a_{yk})] \cos\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) + \right. \\ \left. + [b_{yk} + \tau v(d_{yk} - b_{yk})] \sin\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) \right\}; \\ z(u, v) = \frac{1}{2}[a_{z0} + \tau v(c_{z0} - a_{z0})] + \\ + \sum\limits_{k=1}^{n} \left\{ [a_{zk} + \tau v(c_{zk} - a_{zk})] \cos\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) + \right. \\ \left. + [b_{zk} + \tau v(d_{zk} - b_{zk})] \sin\left(k \frac{2\pi}{T} u\right) \right\}, \end{cases} \quad (9)$$

где $a_{xk} = \frac{2}{T} \int\limits_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_l(\tau) \cos\left(k \frac{2\pi}{T} \tau\right) d_\tau$; $b_{xk} = \frac{2}{T} \int\limits_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_l(\tau) \sin\left(k \frac{2\pi}{T} \tau\right) d_\tau$;

$$c_{xk} = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_r(\tau)\cos\left(k\frac{2\pi}{T}\tau\right)d_\tau; \quad d_{xk} = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_r(\tau)\sin\left(k\frac{2\pi}{T}\tau\right)d_\tau$$

при $k \in [0; n_x]$.

3. Создание топологической модели объединения поверхностей для расчета траектории движения инструмента

Созданная модель представления базовых геометрических элементов для расчета траектории движения инструмента ориентирована на многоосевую фрезерную обработку с возможностью параметрического задания технологических параметров. Доля многокоординатного фрезерования среди других видов металлообработки с каждым годом увеличивается. Однако наряду с элементарными требованиями обеспечения обработки за одну установку без смены технологических баз возникает и ряд принципиально новых задач, которые можно разбить на три основные группы:

1) обеспечение максимальной скорости обработки и сокращение сроков выпуска готового изделия;

2) сокращение числа технологических переходов путем повышения точности промежуточных этапов обработки;

3) повышение точности изготовления изделия для обеспечения новых требований заказчиков.

Все представленные выше тенденции должны адекватно учитываться при технологической подготовке производства. Таким образом, CAD/CAM система, в которой рассчитываются управляющие программы, должна точно описывать геометрию детали, обладать гибкостью задания относительного положения инструмента и детали, а также иметь возможность учитывать особенности процесса резания. При этом в структуре самой системы должны быть учтены и особенности ведения всей электронной документации, поступающей с этапа конструирования. Именно такие виды исходной информации являются основными при моделировании обработки.

Решения подобных задач реализуются в специализированных программных модулях, выполненных для совместного использования с программным комплексом T-Flex в рамках CAM системы T-Flex ЧПУ 10.0 совместной разработки МГТУ "Станкин" и компании "Топсистемы". Для демонстрации параметров и операций, выполняемых этими модулями, рассмотрим пример расчета управляющей программы для обработки деталей с пространственно-сложными поверхностями (ПСП).

Пространственную сложность поверхностей рассматриваемых деталей (рис. 2) определяют следующие факторы:

1. *Геометрическая сложность.* Детали состоят из поверхностей двойной кривизны и плавных сопряжений, полученных на этапе гидродинамического или газодинамического анализа при расчете технических характеристик агрегатов. Этот аспект не позволяет проводить расчеты траекторий движения инструмента на основе

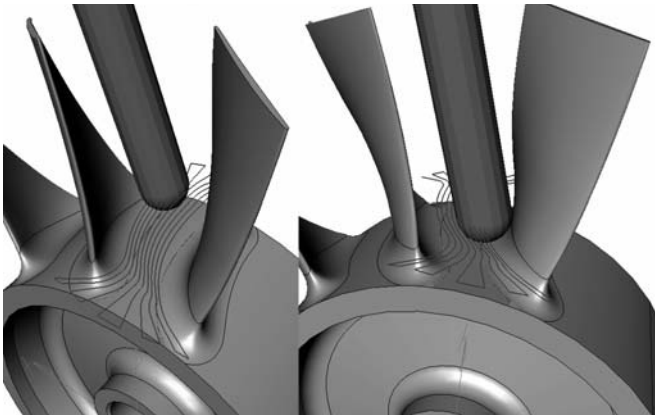


Рис. 2. Пример пространственной сложности поверхностей

линейчатых переходов по подобным контурам, перетекающим от направляющих к ограничивающим. Необходимо учитывать координаты каждой точки на поверхности и направления нормалей в них для точного расчета координат положения и наклона инструмента. Причем учет непрерывности перехода от точки к точке необходимо контролировать минимум до второй производной, анализируя процесс изменения кривизны.

2. *Технологическая сложность.* Особенности взаимного расположения поверхностей обрабатываемых деталей приводят к образованию "теневых зон" и сужений. Кроме того, технологический эффект "проскальзывания" инструмента также заставляет учитывать касание вершиной фрезы обрабатываемых и ограничивающих поверхностей изделия, так как именно это приводит к подрезам поверхностей. Наклон инструмента в этом случае необходимо задавать так, чтобы исключить задевание периферийной частью инструмента других поверхностей и обеспечить увод вершины фрезы из граничных положений касательного пятна.

3. *Геометрическо-технологическая сложность.* Соотношение геометрических размеров элементов детали (например, высоты и толщины лопатки), а также место перехода базовых образующих поверхностей дают неравномерное распределение жесткости вдоль всей обрабатываемой поверхности. Именно различные величины обратной податливости геометрических элементов детали не позволяют использовать постоянные усилия резания, что, в свою очередь, обусловливает невозможность задания постоянных переходных технологических параметров (припуска на обработку, подачи на проходе и т. д.). Все это приводит к необходимости формирования определяющих условий на основе технологических параметров в непрерывно переменной зависимости при расчетах управляющих программ.

В функции модулей расчета траекторий и подготовки управляющей программы системы T-Flex ЧПУ включены специализированные алгоритмы, позволяющие учитывать эти особенности.

Основными функциями подготовительного этапа параметрической обработки являются: расчет базовых областей определения каждой поверхности, формирующих вид прохода траектории относительно детали; соз-

дание единой габаритной структуры путем задания технологом дополнительных геометрических элементов модели и определения составляющих обрабатываемых и ограничивающих граней. Для использования этого алгоритма необходимо построить 3D-контур на основе ограничивающих граней, а затем перейти к заданию геометрических параметров подготовки управляющей программы. Последовательно выбирая модель детали (твердое тело) и указывая на ней направляющий 3D-путь (верхний контур) и ограничивающий 3D-путь (нижний контур), технолог определяет геометрическую компоненту траектории (пути могут быть замкнутыми). Дальнейшими шагами расчета являются следующие:

1) поверхности, ограниченные выбранными путями, программно "сшиваются" в единую поверхность;

2) к образованной поверхности строится эквидистанта, величина смещения которой определяется радиусом инструмента;

3) рассчитываются точки траектории, лежащие на этой поверхности, с учетом равномерного перехода параметрической зоны от верхней ограничивающей грани, где принимается $V = 0$, до нижней ограничивающей грани, где принимается $V = 1$. Причем в зависимости от типа выбранных проходов можно получить набор замкнутых витков траектории: каждая точка витка идет либо с постоянной составляющей по $V = \text{const}$ — "петля" или "зигзаг", либо с постоянной величиной заглубления по $V' = V + dV$ — спиральная линия с постоянным шагом заглубления.

Этот способ позволяет не только получить траекторию движения инструмента с точно определенным его положением относительно поверхности, но и учесть форму ограничивающих контуров, задающих форму проходов. Такой вид формообразования переходного уровня можно обеспечить, исходя из основных расчетных зависимостей аппроксимирующих функций, реализующих скользящую параметрическую зону без использования дополнительных порций. Это позволяет на этапе изготовления детали учесть ее функциональные особенности (рис. 3), а именно формирование остаточного гребешка на рабочих поверхностях детали в направлениях, соответствующих протеканию рабочих потоков при функционировании данного колеса в составе готового изделия.

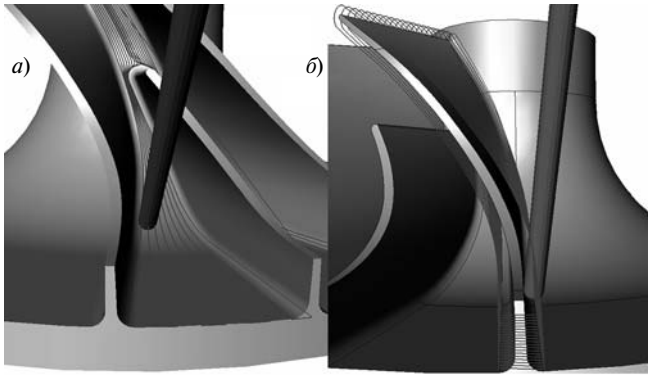


Рис. 3. Пример учета функциональных особенностей детали при расчете траекторий формообразования:
а — обработка ступицы ("корыто" ограничивает); *б* — обработка лопатки (ступица ограничивает)

Основные особенности использования топологической модели, в которую входят все обрабатываемые поверхности, заключаются в равномерной параметрической зоне, которая на каждой порции не изменяет параметризации текущей изолинии, но при этом имеет равномерную область определения в обоих направлениях: по U и по V. Таким образом, построение траектории движения инструмента по спирали сводится к равномерному перетеканию параметров, а для снятия начального гребешка достаточно добавления двух проходов с $V = \text{const}$.

Преимущества описанного способа расчета движения инструмента при обработке по спиральной траектории очевидны:

1) непрерывный и постоянный съем материала. При постоянном накопленном шаге, переходящем от точки к точке по параметру V, происходит постепенное заглубление инструмента, что, в свою очередь, исключает образование скользящих зон врезания инструмента на поверхности, как в случае обработки по замкнутым проходам при переходе на следующий проход. Кроме того, при формировании траекторий с замкнутыми проходами появляется возможность определения точки сбега для расчета плавного отскока на врезание;

2) время обработки определяется процессом резания. Исключаются вспомогательные переходы с одной высоты на другую и необходимость корректировки узловых поверхностей, сопрягающих основные геометрические элементы.

4. Расчет траекторий движения инструмента с учетом особенностей многокоординатного фрезерования

К таким особенностям можно отнести различные параметрические способы задания угла опережения, параметрического позиционного фрезерования и параметрического определения припуска. Правильный расчет положения инструмента относительно обрабатываемой детали определяет ее геометрические размеры. Для удобства настройки технологического оборудования, наладки инструмента и привязки технологической оснастки программирование пятикоординатной обработки обычно выполняют по центру режущего инструмента. Такой выбор базовой точки фрезы позволяет не только создавать более упрощенные управляющие программы, но и исключить фактор влияния угла установки фрезы на линейные перемещения. Однако при обработке изделий на станках и получении конечной детали качество изготовляемых поверхностей во многом зависит от технологических режимов резания, а также от углового положения инструмента относительно формируемой поверхности. Это придает большую значимость способу задания углов опережения, а также критериев их определения относительно текущего движения инструмента. Еще одним вопросом при реализации алгоритмов задания углов опережения являются динамические составляющие станочного оборудования, иными словами, любое перемещение манипулятора ве-

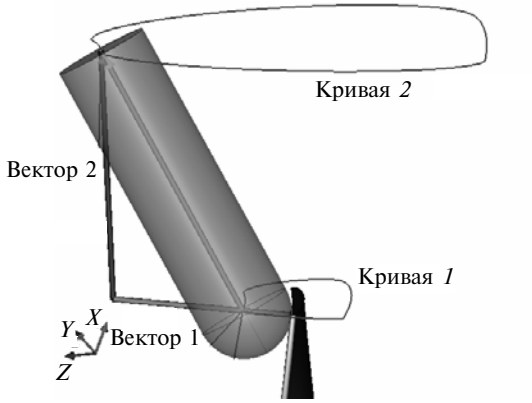


Рис. 4. Пример построения ориентирующих кривых при расчете траекторий движения инструмента

дет к дополнительному разложению вектора скоростей и ускорений, который зависит от полосы пропускания приводов, шага интерполятора и величины добротности.

Для расчета углов опережения в системе T-Flex ЧПУ существует несколько возможностей:

1) углы опережения задаются как наклон инструмента вдоль и перпендикулярно к направлению движения;

2) наклон инструмента задается ориентирующим контуром;

3) угол опережения — двойная эквидистанта. В этом случае ось инструмента проходит через соответствующие точки на двух пространственных кривых (рис. 4): кривая *1* — это траектория движения центра сферы инструмента, рассчитанная по методу объединенной поверхности; кривая *2* — это пространственная линия, полученная преобразованием кривой *1* в такой последовательности: вектор 1 определяет эквидистантное расширение линии в направлении нормали с исходной поверхности; вектор 2 задает величину подъема расширенной траектории относительно плоской грани детали. Таким образом, полученная кривая *2* подобна кривой *1*, а наклон инструмента учитывает также направление нормали в точке контакта инструмента и модели.

Такой способ позволяет задать постоянный угол наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности в направлении, перпендикулярном к движению, а не относительно исходного положения инструмента на траектории, что отличает этот способ от традиционного.

Однако для рассматриваемой поверхности двойной кривизны обработка с изменяемым углом наклона в каждой точке траектории является избыточной. Поскольку в двух соседних точках поверхности разное направление нормали, то согласно расчету при обработке наклон инструмента будет изменяться. Для гладких поверхностей с малой кривизной это будет негативно отражаться на качестве обработанной поверхности. Открытая поверхность может быть обработана с фиксированным углом наклона относительно системы координат детали;

4) позиционное фрезерование. Обработка ведется на пятикоординатном оборудовании с фиксированными угловыми координатами за счет линейных перемещений. Модуль 5D-зонное фрезерование системы T-Flex ЧПУ поддерживает одновременное использование позиционной и пятикоординатной обработки при расчете траектории движения инструмента.

В диалоговом режиме возможно задание диапазонов и значений изменения углов опережения. Диапазон определяется параметрическим способом как интервал длины первого выбранного 3D-пути. Значения углов опережения по/перпендикулярно движению откладываются от выбранного направления в соответствующих ортогональных плоскостях.

Для вентиляторного колеса при установленных значениях была получена обработка со следующими характерными зонами (рис. 5):

1) боковые поверхности лопатки — трехкоординатное фрезерование с фиксированным угловыми координатами (3D + 2D);

2) поверхности скругления — пятикоординатное фрезерование (5D).

С технологической точки зрения это наиболее оптимальное сочетание: формообразование при трехкоординатном фрезеровании и непрерывность спиральной траектории благодаря пяти координатным перемещениям. Дополнительно при расчетах таких траекторий появляется возможность снизить влияние динамических составляющих станка на качество изготовляемых изделий. Это особенно актуально при формообразующих движениях инструмента вдоль основного профиля, который является элементом, определяющим работоспособность всего изделия. При наличии базовых сечений стыковка заготовки с инструментальной поверхностью проходит в автоматическом режиме, а распределение задачи аппроксимации учитывается на обрабатываемой поверхности.

Аналогичным образом для подобных деталей необходим алгоритмический инструмент, обеспечивающий дополнительные способы внесения геометрических корректировок в формообразующие движения инструмента для обеспечения ряда конструкторских требований. Одной из наиболее сложных задач в решении этого вопроса является пересчет базовой геометрии в середину поля допуска. Сделать модель детали с учетом таких

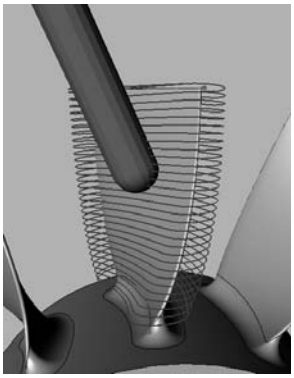


Рис. 5. Пример расчета движения пятикоординатной траектории для высокоскоростной обработки

Рис. 6. Рабочая зона фрезерного станка с ЧПУ

требований практически невозможно, потому что основная часть проектной структуры по изделию готовится в специальных системах газодинамического анализа установок, а конструктор получает только электронные образы обменных файлов и данные по базовым профилям.

На этапе технологической подготовки изготовления деталей на станках с ЧПУ одной из основных задач является обеспечение заданных требований точности геометрических размеров.

Элементы деталей с ПСП, например лопатки вентиляторного колеса, конструируются в виде набора сечений/профилей с переменными геометрическими параметрами. Соответственно, допуски на размеры этих сечений изменяются в зависимости от высоты их расположения. При изготовлении эта неоднозначность дополняется различными значениями жесткости лопатки в верхнем и нижнем (у ступицы колеса) сечениях, внося тем самым существенные погрешности размеров обрабатываемой лопатки из-за отжимов, происходящих во время резания.

Для корректировки этих искажений и обеспечения середины поля допуска в системе реализована возможность задания как увеличивающего, так и уменьшающего переменного припуска, если необходимо выдержать размер с отрицательным полем допуска. Причем изменение припуска двунаправленное. Первое направление определяется плоскостью 3D-пути, в которой в параметрах длины пути задаются значения припусков. Высота лопатки, ограниченная двумя 3D-путями, задает второе направление. Припуск изменяется линейно от значения на верхнем сечении до нижнего.

Разработка стратегии и управляющей программы обработки данной лопатки ведется с одной моделью и с одной траекторией движения инструмента. Задание же переменного параметрического припуска позволяет разбить все поверхности тела на зоны, с выделением "проблемных", и ввести необходимые коррекции в соответствии с геометрическими особенностями модели и технологическими особенностями обработки.

Лучшими показателями эффективности применения рассмотренного алгоритмического и программного аппарата учета технологических аспектов обработки являются реализация в системе T-Flex ЧПУ специальных модулей, а также детали, изготовленные с использованием управляющей программы, подготовленной в этой системе.

5. Примеры использования разработанных методов в стоматологических CAD/CAM системах

В последние годы быстрыми темпами стали развиваться и внедряться в практику стоматологические CAD/CAM системы для моделирования формы зубов и их изготовления на многокоординатных настольных станках с ЧПУ.

Стоматологическая CAD/CAM система включает в себя: сканер; математическое обеспечение для работы со сканером и реставрированными моделями; настольный фрезерный станок с ЧПУ (рис. 6); математическое обеспечение для работы с фрезерным станком с ЧПУ. Сканер — это оптомеханическое устройство для бесконтактного оптического измерения поверхностей моделей зубов. Сканер состоит из стоматологической трехмерной камеры, держателя и трехкоординатного стола (с двумя линейными и одним угловым перемещениями). Стоматологическая модель размещается на столе. Перемещение модели позволяет регистрировать и реконструировать ее составляющие части. В итоге отдельные реконструированные поверхности модели зуба объединяются посредством математического обеспечения в единое целое.

Основные характеристики системы:

Точность, мкм:	
измерения поверхностей зубов	25
изготовления поверхностей зубов	40
Время программирования обработки, мин	Не более 10
Габаритные размеры фрезерного станка с ЧПУ, мм	490 × 460 × 370
Масса фрезерного станка с ЧПУ, кг	Не более 50

Выводы

1. При работе со специализированными модулями CAM системы технолог-программист использует минимальное число геометрических элементов, необходимых для выбора стратегии обработки, что невозможно осуществить, используя стандартный подход моделирования в CAM системе. Это позволяет сократить время программирования обработки сложных деталей в 4—5 раз.

2. Для обеспечения геометрической точности изготовляемой детали сам процесс формообразующих перемещений необходимо реализовывать как непрерывную модель с использованием эквидистантных поверхностей, что позволяет существенно повысить точность обработки деталей.

3. В CAM системе основным критерием технологической гибкости является возможность задания ориентации инструмента в зависимости от технологических особенностей обработки детали. Таким образом, можно использовать все преимущества многокоординатной обработки на станках с ЧПУ.

4. Заданная точность обработки и минимизация брака обеспечивается на двух этапах расчетов траекторий: 1) выведение траекторий в середину поля допуска; 2) учет переменной податливости детали в двух направлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Де Бор К.** Практическое руководство по сплайнам. М.: Наука, 1983.
2. **Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л.** Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.
3. **Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П.** Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Петров А. В., Черненький В. М.** Разработка САПР. М.: Высшая школа, 1990.
5. **Шикин Е. В., Плис А. И.** Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: Диалог-МИФИ, 1996.
6. **Шпур Г., Краузе Ф. Л.** Автоматизированное проектирование в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988.

УДК 621.921.34:621.923.74

В. П. БАХАРЕВ, канд. техн. наук (филиал МГИУ, г. Кинешма),
М. Ю. КУЛИКОВ, д-р техн. наук (МГУПС "МИИТ"),
А. С. ВЕРЕЩАКА, д-р техн. наук (МГТУ "Станкин")

Регулирование микродоводочных процессов финишной обработки минералокерамики путем применения эффективных СОТС

Рассмотрены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований влияния смазочно-охлаждающих технологических сред различного состава на выходные показатели процесса алмазной обработки высокоглиноземистой керамики на операциях шлифования и доводки связанным абразивом.

Theoretic analysis and experimental investigation results of the effect of cooling lubricants of various compositions on the outgoing data of the high-alumina ceramics diamond grinding at fixed-abrasive grinding and finishing operations.

Технический прогресс в машиностроении предусматривает повышение требований к точности и надежности механизмов и машин. Эти требования ужесточают технические условия на изготовление большинства деталей, входящих в механические устройства. Такие технические условия можно обеспечить лишь на операциях тонкой абразивной обработки и естественно, что объем абразивных процессов резания в машиностроении не уменьшается.

Особо следует выделить процессы обработки, которые должны обеспечить высокие требования по макроточностным и микроточностным характеристикам одновременно, а также выдержать жесткие требования, предъявляемые к качеству поверхностного слоя. Такие высокие требования предъявляются обычно к тем поверхностям изделий, которые, выполняя свои функциональные назначения, должны обеспечить долговечность их работы, а также высокие и надежные физико-технические характеристики деталей, приборов и устройств. Необходимые точностные и структурные характеристики поверхностей этих изделий обеспечиваются на последних финишных операциях, для чего зачастую вынужденно применяются несколько переходов абразивной обработки со щадящими режимами, что очень неэкономично, особенно в условиях серийного и крупносерийного производств [1].

Особое место в ряду конструкционных материалов занимает минералокерамика ВК-100-1 ("поликор") на основе огнеупорного окисла алюминия, применяемого в качестве механического носителя гибридных интегральных микросхем (ГИС). Функциональное назначение поликорундовых пластин определяет особые требования к качеству их обработки, шероховатости поверхности, физическому состоянию поверхностных слоев (глубина приповерхностных трещин, уровень макро- и микронапряжений) [2].

Специфические физико-механические свойства позволяют отнести "поликор" к группе наиболее труднообрабатываемых материалов, резание которых осуществляется алмазно-абразивным инструментом и вследствие высокой термосиловой напряженности процесса практически невозможно без применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). При этом применение традиционных технологических СОТС не обеспечивает достижения требуемых параметров качества при шлифовании "поликора", что приводит к высокому проценту брака. Отсюда становится очевидной задача разработки специальных мероприятий по регулированию микродоводочных процессов путем изучения особенностей контактных процессов в системе "абразив—керамика—среда" и определения влияния функциональных свойств технологической среды на параметры обработки.

Усовершенствование технологических процессов абразивной доводки путем создания более совершенных узлов станков и оснастки дает меньший эффект, чем получаемый в лезвийных процессах обработки. Поэтому, с нашей точки зрения, при усовершенствовании доводочных процессов связанным абразивом наиболее правильным следует считать подход, когда основное внимание уделяется исследованию явлений, происходящих при обработке непосредственно в контакте деталь—инструмент. Непосредственное управление контактными процессами позволяет достаточно быстро устранять нежелательные явления, определяющие качественные выходные показатели процесса. Наиболее перспективным методом анализа таких сложных процессов является фрактальный анализ, позволяющий оценить динамическую устойчивость системы резания в контексте ее эволюции [3].

Важное значение имеет управление упругими перемещениями элементов технологической системы, определяемыми вязкостью технологической среды в зоне резания. В работах [4, 5] приведена формализованная физико-математическая теория точности обработки при резании, ряд важных практических решений которой пригодны для выявления и обоснования путей повышения точности обработки. Зависимость упругого перемещения Y в технологической системе при тонком точении имеет вид:

$$Y = \frac{2{,}53Rt}{C\cos\varphi}(HV)^{0{,}67}(\alpha\tau_{сдв})^{0{,}33}, \qquad (1)$$

где R — радиус округления режущей кромки в плане, м; t — глубина резания, мм; C — жесткость технологической системы, Н/м; φ — главный угол в плане; HV — твердость обрабатываемого материала, Н/м^2; $\tau_{сдв}$ — предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м^2; $\alpha = a/R$ — коэффициент, определяющий условия перехода от упругопластического деформирования металла к резанию (по экспериментальным данным $\alpha > 0{,}04$). Здесь: $a = S_0\cos\varphi$ — толщина среза; S_0 — продольная подача, мм/об.

Исходя из зависимости (1), уменьшить величину Y (повысить точность обработки) можно уменьшением значений параметров R, t и увеличением значения C. Однако уменьшение глубины t резания ведет к снижению производительности обработки. Следовательно, эффективнее увеличивать жесткость C и уменьшать радиус R. Так как величина C при абразивной обработке ограничена параметрами круга, основным путем уменьшения Y предлагается уменьшение R, т. е. необходимо обеспечить высокую остроту режущей кромки инструмента. Большими возможностями в этом направлении располагают алмазно-абразивные инструменты ввиду высокой остроты режущих кромок алмазных зерен [1]. При этом важно своевременно удалять с рабочей поверхности алмазного круга затупившиеся зерна.

Важное значение имеет управление коэффициентом $\alpha = a/R$ путем установления правильного соотношения между толщиной a среза и радиусом R скругления режущей кромки инструмента. Как известно [1], с точки зрения улучшения процесса стружкообразования при резании коэффициент α необходимо увеличивать путем увеличения толщины a среза и уменьшения радиуса R. Исходя из зависимости (1), с целью уменьшения упругого перемещения Y в технологической системе коэффициент α следует уменьшать до минимально возможной для стружкообразования величины. Например, экспериментально установлено, что процесс стружкообразования при микрорезании единичным зерном наиболее интенсивно протекает при значениях коэффициента $\alpha > 0{,}35$. При $\alpha < 0{,}04$ процесс стружкообразования прекращается, обрабатываемый металл подвергается лишь упругому и упругопластическому деформированию без отделения стружки.

Из проведенного анализа следует, что между кинематическими параметрами, характеризующими условия резания и входящими в зависимость (1), существует сложная связь. С одной стороны, радиус R входит в числитель зависимости, а с другой — в знаменатель, но с меньшей степенью — 0,33, т. е. в итоге радиус R входит в зависимость со степенью 0,67 и его необходимо уменьшать с целью уменьшения величины Y. Коэффициент α при этом будет увеличиваться, а производительность обработки останется неизменной. При таком подходе не будет нарушаться условие стружкообразования $\alpha > 0{,}04$, так как коэффициент α будет увеличиваться с уменьшением R.

Одним из факторов, существенно изменяющих жесткость C в зоне резания, являются СОТС, использование которых обязательно при абразивной обработке хрупких неметаллических материалов (ХНМ). Даже при оптимизации всех остальных параметров, определяющих состояние технологической системы при резании, использование СОТС с направленными свойствами позволит дополнительно повысить эффективность процессов резания путем изменения условий диспергирования обрабатываемого материала в зоне резания [6, 7]. Под силовым воздействием инструмента и влиянием СОТС изменяются прочностные и теплофизические характеристики, химические и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Кроме того, свойства самого инструмента претерпевают изменения в процессе резания. В совокупности это приводит к изменению уровня выходных параметров процесса (параметров функционирования системы резания).

Анализируя зависимость (1), следует обратить внимание на то, что параметры HV и $\tau_{сдв}$, определяющие твердость и прочность обрабатываемого материала, в разной степени влияют на величину упругого перемещения Y: твердость HV оказывает большее влияние на Y, чем предел прочности $\tau_{сдв}$ обрабатываемого материала на сдвиг. Это означает, что упругие перемещения и точность обработки в первую очередь определяет твердость материала, т. е. чем тверже материал, тем труднее добиться требуемой точности обработки.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса резания керамики [2, 6, 7] позволяют, исходя из особенностей механизмов диспергирования ХНМ при абразивной обработке, заключить, что степень дефектности формируемого поверхностного слоя определяется напряженным состоянием зоны резания, характеризуемым уровнем силового воздействия на обрабатываемую поверхность (т. е. энергоемкостью процесса резания), и зависит от двух факторов, изменяющих уровень этого воздействия:

физико-механических свойств обрабатываемого материала (его прочности, твердости, хрупкости, поверхностной энергии, исходной дефектности и т. д.);

технологических параметров (факторов) процесса обработки: схемы резания, определяющей величину и направленность составляющих усилия резания; режима резания; технологических и эксплуатационных характеристик применяемых инструмента и методов восстановления поверхности.

Исходя из изложенного, можно сказать, что настоящая работа посвящена теоретическому обоснованию механизмов воздействия технологических сред различной природы на процессы абразивной обработки ХНМ с целью обеспечения показателей качества.

При обработке хрупких материалов типа стекла или керамики в условиях, обеспечивающих интенсивное разрушение припуска, преобладает хрупкое разрушение [6]. При шлифовании хрупких материалов процесс резания может моделироваться как процесс трещинообразования, в котором напряженное состояние материала при расклинивании определяется особенностями возникновения и движения трещины разрушения [8]. Поэтому составляющие усилия резания должны рассчитываться с позиций теории трещинообразования. Предполагается, что сила резания определяется сопротивлением материала скалыванию (хрупкому сдвигу) в плоскости максимальных напряжений сдвига.

Приняв положение работы [1], согласно которому между отдельными процессами резания не имеется принципиальной разницы, так как процесс стружкообразования на режущих элементах различных инструментов протекает идентично независимо от их конструктивного оформления, рассмотрим процесс диспергирования как процесс, происходящий при взаимодействии режущего клина с обрабатываемым материалом. В этом случае энергия формообразования определяется, в основном, величиной тангенциальной составляющей P_z силы резания. В отличие от случая резания пластичного материала, когда напряжение в зоне сдвига является

функцией степени пластической деформации, а в большинстве случаев и интенсивности деформаций и температуры, при резании хрупких материалов сопротивление сдвигу в плоскости максимальных касательных напряжений должно быть постоянным для данного обрабатываемого материала.

В основу вывода уравнения силы при резании хрупкого материала положено условие постоянства максимального разрушающего напряжения и независимости его от геометрии инструмента, размеров срезаемого слоя и скорости резания. Значение скалывающих напряжений τ_c, приводящих к разрушению объема материала по плоскости скалывания, определяется зависимостью $\tau_c = E\gamma_0/L_c p_c$, где E и γ_0 — соответственно модуль Юнга и удельная свободная поверхностная энергия обрабатываемого материала, Н/м^2; L_c — длина сечения скола, м; p_c — разрушающее напряжение, нормальное к плоскости трещины, Н/м^2.

Для хрупкого разрушения величина p_c совпадает с пределом прочности материала при растяжении $[\sigma_p]$. Тогда сила скола $P\tau$, Н, определится как:

$$P_\tau = \frac{E\gamma_0}{L_c[\sigma_p]}\frac{a_c b_c}{\sin\beta_c} \text{ или } P_\tau = \frac{K_{1C}^2}{\pi^2 L_c[\sigma_p]}\frac{a_c b_c}{\sin\beta_c},$$

где $a_c b_c$ — площадь поперечного сечения скола, м^2; β — угол сдвига; K_{1C} — вязкость разрушения обрабатываемого материала, МПа · м$^{1/2}$.

Сила P_τ характеризует уровень как тангенциальной (P_z), так и нормальной (P_n) составляющих силы резания, определяя энергоемкость процесса резания (соответствует P_z) и силовое воздействие на обрабатываемую поверхность (соответствует P_y). При прочих равных условиях эти параметры зависят от значения удельной свободной поверхностной энергии γ_0 твердого тела или от величины его эффективной поверхностной энергии γ_m при образовании новых поверхностей [8]. При хрупком разрушении эффективная поверхностная энергия определяет работу $A_д$, затрачиваемую на диспергирование: $A_д \cong A_д(\gamma_m)$.

Согласно соотношению Гриффитса связь между прочностью p_c и работой $A_д$ на диспергирование аппроксимируется зависимостью $p_c \cong A_д^{1/2}$. Так как $A_д$ может быть отождествлена с γ_m, то $p_c \cong \gamma_m^{1/2}$.

Как известно [6, 7], введение в зону диспергирования твердых тел поверхностно-активных веществ (ПАВ) приводит к снижению их эффективной поверхностной энергии γ_m за счет адсорбционных взаимодействий атомов среды деформируемого тела, т. е. к соответствующему изменению его прочностных свойств. Облегчение развития новых поверхностей, сопровождающее процессы деформирования и разрушения твердых тел в присутствии поверхностно-активных СОТС, связано с проявлением адсорбционного эффекта понижения прочности твердых тел (эффект Ребиндера). Это позволяет уменьшить энергоемкость процесса резания и интенсифицировать режимы обработки, повысив тем самым ее производительность.

В работе [7] на основании современных теоретических концепций механизма действия СОТС при тонких методах абразивной обработки и с учетом особенностей контактных взаимодействий было сделано предположение, что эффективность технологической среды при полировании металлов определяется синергизмом антиадгезионного и диспергирующего эффектов. Причем антиадгезионная функция реализуется за счет образования первичных и вторичных антиадгезионных структур в зоне резания, а диспергирующая — за счет уменьшения окисления деформируемого слоя и проявления эффекта адсорбционного пластифицирования, что соответствует положениям работы [6].

К испытаниям для определения технологической эффективности различных СОТС при шлифовании радиотехнической керамики были приняты: базовые составы, рекомендуемые Л. В. Худобиным для сравнительных испытаний при абразивной обработке материалов; жидкости, рекомендуемые В. А. Хрульковым для прецизионного шлифования керамических материалов алмазными кругами на металлической связке; серийно выпускаемые эмульсолы. На некоторых этапах работы определялось влияние на силовые параметры обработки керамики СОТС L-35 Castrol в процентном отношении, рекомендуемом для данных операций фирмами-изготовителями, и ряда модельных составов.

В результате модельных исследований для шлифования изделий из сверхтвердых материалов поликорундовой керамики разработаны специальные СОТС, содержащие в качестве теплоносителя раствор этиленгликоля, в качестве антиадгезионных присадок — анионактивные ПАВ, а также пакет антикоррозионных, антипенных, бактерицидных присадок "Прогресс-13" [7].

Моющая эффективность растворов ПАВ оценивалась по режущей способности круга АС4 63/50 МІ при шлифовании "поликора" в различных жидкостях. При выборе способа подачи СОЖ авторы исходили из того, что он должен быть таким, чтобы по возможности перекрыть проявление других эффектов СОТС. Шлифование "поликора" осуществлялось кругами прямого профиля (1А1) зернистостью 63/50 на металлической связке (МІ) на станке ЗЛ722 в технологическом режиме: v = 36 м/с; t = 0,1 мм; $S_{поп}$ = 1 мм; $S_{пр}$ = 10÷15 м/мин.

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью ЭВМ. Для определения коэффициента корреляции между технологическими параметрами обработки и активностью проявления антиадгезионного действия среды были проведены испытания СОТС с добавками исследуемых ПАВ при шлифовании поликорундовых пластин на предмет выхода годных подложек с требуемой шероховатостью (1,25 мкм). Экспериментальные данные позволили определить коэффициент корреляции между технологической эффективностью обработки и антиадгезионной функцией: r = 0,85.

Основными оценочными критериями эффективности СОТС были приняты:

группа характеристик качества поверхности (шероховатость, фактическое распределение высоты микронеровностей по поверхности шлифовальных пластин, физическое состояние поверхности);

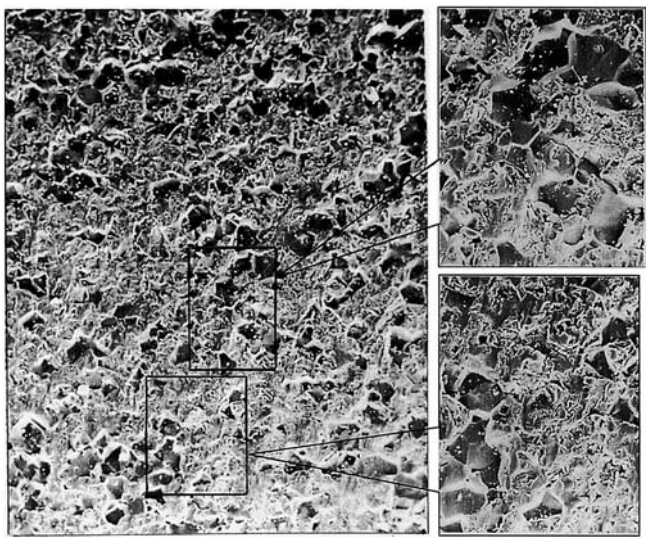
стойкость инструмента, температура и усилие резания.

Температуру в зоне обработки измеряли полуискусственной термопарой, одним электродом горячего спая которой являлась совокупная поверхность зерен и медьсодержащей связки круга, а вторым — тонкая (500 мкм) пластина монокристаллического кремния, размещенная в плоскости разъема керамической заготовки. По результатам температурных исследований установлено, что СОТС серии "Прогресс" снижают средние температуры в зоне обработки при стандартных скоростных режимах резания по сравнению с базовыми СОТС на 10÷15 %, сдвигая область безопасных с точки зрения термостойкости межкристаллитной связки режимов обработки с $v = 36$ м/с; $t = 0{,}1$ мм; $S_{под} = 1$ мм/дв.ход; $S_{пр} = 4$ м/мин для базовых СОТС до $v = 36$ м/с; $t = 0{,}1$ мм; $S_{под} = 1$ мм/дв.ход; $S_{пр} = 10$ м/мин. Эти режимы соответствуют экономически обоснованным по производительности и удельным затратам режимам плоского шлифования на базовом предприятии.

В соответствии с тепловой и силовой напряженностью процесса шлифования "поликора" определилось ранжирование СОТС по влиянию на шероховатость, жесткость системы резания и стойкость абразивного инструмента. По всем перечисленным выше параметрам СОТС серии "Прогресс" являются наиболее эффективными (табл. 1).

По мере роста тепловой напряженности процесса шлифования "поликора" в соответствии со схемой вязкохрупкого перехода увеличиваются силы резания, что объясняется появлением деформационных составляющих диссипации режущей нагрузки. Результаты измерения силы резания показали, что использование в качестве СОТС воды, снижающей средние температуры в зоне обработки на 15 % по сравнению с обработкой без смазочного материала, снижает составляющие силы резания: P_y на 5÷10 %, P_z — на 25÷40 %. Добавление кальцинированной соды в воду позволяет снизить силовые параметры обработки вдвое. Применение для шлифования керамических материалов, разработанных СОТС "Прогресс-13" и СОТС L-35 Castrol, приводит к уменьшению сил резания на величину, в 2—3 раза большую, чем применение других СОТС.

При шлифовании керамики на основе Al_2O_3 формообразование происходит или отдельными "выколками" в пределах одного кристалла, или в результате сложных упругих деформаций сжатия, которые по достижении предела прочности вызывают сколы частиц материала керамики. Следствием этого является превышение глубины дефектного слоя по сравнению с глубиной резания — наличие трещиноватого, нарушенного подслоя обработанной поверхности.



а) *б*)

Структура шлифованной поверхности керамического изделия: *а* — × 1000; *б* — × 2000

При шлифовании высокотвердых хрупких материалов с СОТС могут быть созданы условия, при которых превалирует пластическая деформация и внутрикристаллические сколы. Линии и ступеньки скольжения с интервалом 0,1÷0,2 мкм, наблюдаемые на электронномикроскопических фотографиях с угóльных реплик (× 2500÷3500), как правило, прерываются на границах зерен, являющихся эффективными стопорами для движущихся дислокаций. Для керамики характерными параметрами структуры являются размеры и очертания границ зерен и примесей или их сегрегации, а также число и размеры пор и стеклофазы (рисунок).

Для вакуумплотной, практически цельнокристаллической керамики типа "поликор", в которой отсутствует стеклофаза, на процесс формообразования влияют также ориентация зерен, размеры, форма и распределение пор. Развитие трещин происходит, прежде всего, по границам зерен, что является основным элементом механизма разрушения керамики при шлифовании. Если для металлов пластическое течение в соседнее зерно может передаваться путем прохождения дислокации через границу с после-

Таблица 1

Влияние СОТС на параметры функционирования системы резания

Технологическая среда	Средняя температура в зоне резания t, °С	Шероховатость обрабатываемой поверхности $\overline{R}_a$, мкм	Доля измерений, соответствующих шероховатости 1,25 мкм, %	Доля изделий, отнесенных по параметру $\overline{R}_a$ к годным, %
Вода	660	1,65	3	0
3 %-й содовый раствор	615	1,30	35	23
Раствор этиленгликоля 12 %-й	590	1,20	69	42
Раствор ПАВ «ДНС-А»	610	1,35	31	19
Раствор касторового масла	600	1,15	80	57
«Прогресс-13»	560	1,09	89—90	62

Примечание. Данные получены совместно с автором работы [7].

Таблица 2

Экспериментальные и рассчетные данные физических характеристик обработанной поверхности керамики ВК100-1

HLK	Образец	$\delta \cdot 10^3$, рад	B', $b' \cdot 10^4$, рад	B, $b \cdot 10^4$, рад	$\beta \cdot 10^4$, рад	β_2/β_1
102	Эталон	1,02	35,436	31,893	0	0
	Образец 1 (полирование)		37,624	34,238	3,102	2,115
	Образец 2 (шлифование)		39,957	36,760	6,388	1,439
	Образец 3 (доводка)		39,142	35,820	5,544	1,52
204	Эталон	2,79	41,457	28,605	0	0
	Образец 1 (полированный)		47,346	33,616	6,562	2,115
	Образец 2 (шлифованный)		48,207	35,673	9,196	1,439
	Образец 3 (доводка)		47,920	34,853	8,427	1,52

дующей генерацией нового фронта дислокаций, то для хрупких материалов типа спеченой окиси алюминия на препятствиях происходит зарождение микротрещин.

Сопоставление данных измерения шероховатости и фрактографического анализа шлифованных поверхностей позволяет сделать вывод о существовании устойчивой корреляционной связи между наличием на обработанной поверхности раковин, следов вырывания зерен или блока корундовых кристаллов с крупными осцилляциями профиля и средней высотой микронеровностей поверхности (параметр *Rz*) (см. рисунок).

Для пластин, функциональная нагрузка которых определяется требованиями радиоэлектроники, особое значение имеют физическое состояние поверхностных слоев, уровень и знак макронапряжений в подложке. Данные рентгеноструктурного анализа показали, что при всех используемых режимах шлифования в приповерхностных слоях формируются избыточные напряжения растяжения, уровень которых при отсутствии интенсивных пластических деформаций определяется температурной напряженностью процесса обработки. В связи с этим появление участков крупнозернистого рельефа является не результатом изменения знака напряжении, а следствием превышения уровнем контактных температур критического значения для данного материала. Последнее подтверждается следующим фактом: низким значениям макронапряжений соответствует низкое значение блочности характеристики, определяемой процессами дробления и скалывания кристаллов.

Анализ микронапряжений, возникающих в поверхностном слое, проводили рентгенографическим методом по изменению интегральной ширины дифракционных линий с использованием метода аппроксимации. Дифрактограммы снимали с использованием фильтрованного Cu-K_α излучения (18 кВ, 10 мА) на дифрактометре ДРОН-2.0. Параметры тонкой структуры определялись для кристаллографического направления <102> с фиксацией линий (102) и (204). Результаты измерений приведены в табл. 2.

Результаты анализа свидетельствуют, что физическое уширение дифракционных линий обусловлено как мелкодисперсностью блоков, когерентно рассеивающих рентгеновские лучи, так и миронапряжениям решетки. Ширина линий дифрактограмм уменьшается в последовательности используемых методов механической обработки: шлифование → доводка → полирование → эталон [2].

Совокупное рассмотрение полученных результатов позволяет сделать вывод, что снижение силовой и тепловой напряженности процесса абразивной обработки керамики, происходящее за счет воздействия на контактные процессы эффективных СОТС, может обеспечить приоритетную реализацию внутризеренного разрушения поверхности. При этом СОТС для предварительного или чистового шлифования деталей из керамики следует выбирать, исходя из физико-химического действия, необходимого для получения требуемых физических характеристик поверхности.

Комплексное управление процессом формирования функциональных показателей качества возможно при построении математической модели по управлению пространственно-временны́м температурным полем с учетом градиентов и скорости изменения температур и при использовании современных методов анализа [3, 9] сложных многофакторных технологических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орлов П. Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.
2. **Исследование** процессов финишной алмазной обработки корундовых керамических материалов / Г. А. Смирнов, В. П. Бахарев, М. Ю. Куликов, Т. П. Антюфеева // Вестник машиностроения. 2001. № 9. С. 56—60.
3. **Моделирование** динамики процесса резания на основе фрактального и вэйвлет-анализа. Кабалдин Ю. Г., Серый С. В., Бурдасов Е. Н. // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 37—44.
4. **Теоретические** основы резания и шлифования материалов / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов. Одесса: ОГПУ, 1999. 450 с.
5. **Фадеев В. А.** Научный подход к выбору оптимальных способов и условий финишной обработки агрегатов авиационной техники / Авиационно-космическая техника и технология. Тр. Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". Харьков: Вып. 14. 2000. С. 36—40.
6. **Хрульков В. А., Матвеев В. С., Волков В. В.** Новые СОЖ, применяемые при шлифовании труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1982. 64 с.
7. **Латышев В. Н.** Трибология резания металлов. Иваново: Изд-во ИвГУ, 2003. Ч. X. С. 104.
8. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
9. **Гусев В. В., Калафатова Л. П.** Обеспечение эксплуатационных изделий из конструкционной керамики на стадии их производства. Харьков: НТУ ХПИ. 2006. Т. 2. С. 334—346.

УДК 621.921.8(043)

О. Ю. ЕРЕНКОВ, канд. техн. наук (Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск)

Химико-механический подход к обработке полимерных материалов резанием

Проведен анализ природы взаимодействия полимерных материалов с агрессивными веществами. Разработан способ направленного изменения свойств полимерных материалов путем химической обработки их поверхностного слоя для снижения сопротивления разрушению полимера при механической обработке резанием.

Analysis is carried out for the nature of interaction between polymeric materials and deleterious substances. Procedure of the polymers properties directional alterations by chemical treatment of the surface layer has been developed to reduce cutting crack strength of the polymeric materials.

Разрушение таких конструкционных материалов, как полимерные, может происходить под воздействием агрессивных сред [1, 2]. Это воздействие может проявляться в виде изменения структуры и свойств полимерного материала без нарушения его целостности, например растрескивания, разрыхления и набухания поверхности полимерного материала на определенную глубину. Поэтому анализ процессов, происходящих при взаимодействии химической среды с полимерами, представляет практический интерес, а на его основе возможна разработка химико-механических методов обработки резанием деталей из полимерных материалов.

Агрессивные среды в зависимости от характера их взаимодействия с полимерами можно разделить на две группы: физически активные и химически активные. Особое место занимают поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые могут принадлежать к обеим группам.

Механизм воздействия физически активных сред заключается в их диффундировании в полимерный материал, вследствие чего происходит ослабление связей между молекулами, что приводит к снижению прочностных свойств поверхностного слоя материала.

Химически активные среды при контакте с полимерами вызывают необратимые изменения химической структуры материала. Совокупность химических процессов, приводящих к изменениям химической структуры полимера и его молекулярной массы, называют химической деструкцией.

При взаимодействии полимерных материалов с агрессивными средами могут возникать физические и химические процессы, из которых наиболее важными являются:

адсорбция компонентов агрессивной среды на поверхности полимера;

диффузия агрессивной среды в объеме полимера;

химическая реакция агрессивной среды и полимера с химически нестойкими связями;

диффузия продуктов деструкции к поверхности полимера;

десорбция продуктов деструкции с поверхности полимера [2].

Влияние физически активных агрессивных сред на прочностные свойства полимерных материалов, определяющие их сопротивляемость разрушению, может быть как объемным (набухание), так и поверхностным (адсорбция, поверхностная диффузия). В случае адсорбции только поверхностные участки твердого тела участвуют в процессе, химический потенциал твердого тела при этом не изменяется.

Под поверхностью твердого тела подразумевается не только его наружная поверхность, но и область вокруг отдельных групп молекул, а также поверхность отдельных молекул. Очевидно, что эффективная поверхность твердого тела зависит от надмолекулярной структуры материала и от таких показателей диффундируемого вещества, как размер молекул и их форма.

Адсорбция может происходить и на внутренних участках твердого тела, которые имеют пустоты и поры объемом, достаточным для накопления молекул диффундирующего вещества.

При набухании полимера в физически активных средах обычно уменьшается прочность полимерного материала, но повышается его эластичность [1, 2]. Снижение прочности полимера при набухании может быть вызвано двумя причинами.

Во-первых, возникают внутренние (местные) напряжения вследствие неравномерности набухания полимера. В процессе сорбции растворителей полимерами часто наблюдаются резко разграниченные области с разной степенью набухания [2]. Особенно это характерно для полимеров в стеклообразном состоянии. Это обусловлено прямой зависимостью коэффициента диффузии от концентрации диффундирующего компонента в системе, а также спецификой взаимодействия полимера с данным веществом. В такой системе из-за неодинаковой подвижности молекул поглощаемого вещества и сегментов полимера возникают нестационарные напряжения, которые могут быть очень значительными. Набухшие области полимера испытывают напряжения сжатия со стороны соседних, более жестких не набухших частей, в которых действуют растягивающие напряжения. Неравномерность набухания и возникновение разнородных внутренних напряжений в материале приводят к образованию микротрещин и внутренних микродефектов. Возникающие местные напряжения могут оказаться достаточными для разрыва С—С связей.

Во-вторых, прочность материала может изменяться вследствие изменения межмолекулярного взаимодействия при набухании полимеров.

Однако, как было отмечено выше, набухание полимерного материала способствует повышению его эластичности, т. е. увеличению гибкости его молекулярных цепей и, соответственно, снижению температуры стеклования. Увеличение гибкости молекулярных цепей полимера способствует более выраженной ориентации макромолекул полимера при воздействии на него механической нагрузки, в том числе и при механической обработке полимера режущим инструментом. Таким образом, имеет место эффект деформационного упрочнения

материала. Прочность материала повышается именно в тот момент, когда целесообразнее уменьшение сопротивляемости разрушению. Поэтому с точки зрения эффективности механической обработки набухание полимерных материалов в результате его взаимодействия с агрессивной средой — явление нежелательное. И целесообразнее выполнять такую обработку полимеров, при которой происходит растрескивание или разрыхление поверхностного слоя на требуемую глубину без изменения химического свойства этого полимера.

Адсорбционное воздействие среды имеет внутреннюю (механическую) и внешнюю (энергетическую) составляющие. Первая имеет место в результате адсорбции активных веществ на поверхности дефектов, например трещин, что затрудняет их смыкание. В результате происходит углубление и расширение дефектов. Все это приводит к снижению прочности и увеличению хрупкости твердого тела. Вторая составляющая воздействует на поверхность твердого тела, что приводит к снижению таких показателей, как предел текучести и коэффициент упрочнения материала. Такие показатели, как пластическая деформация, сопротивление ползучести, усталостная прочность, зависят от состояния поверхности. Прочностные показатели твердых тел находятся в пропорциональной зависимости от их поверхностной энергии, следовательно, при снижении свободной поверхностной энергии, т. е. при уменьшении работы образования новых поверхностей, снижаются прочностные показатели материала. Поэтому при уменьшении в результате адсорбции поверхностной энергии наблюдается многочисленное зарождение и развитие трещин, что является причиной снижения прочности материала. Это имеет место и при использовании ПАВ.

Академик П. А. Ребиндер обнаружил и исследовал влияние ПАВ на физические свойства напряженных тел. Эффект Ребиндера распространяется на многие материалы, в том числе и на полимеры. Установлено [3], что такие вещества, как вода и уксусная кислота, значительно снижают эффективность обработки резанием некоторых материалов, а этиловый спирт не оказывает такого действия. Это объясняется адсорбционным эффектом.

Разупрочняющее действие ПАВ на полимерный материал вызвано наличием микротрещин на поверхности твердого тела, что обусловлено технологическим процессом его производства. ПАВ адсорбируется на поверхности тела и проникает в дефекты, в результате в капиллярах создается большое давление: $\Delta P = \frac{2\gamma\cos\theta}{r}$, где ΔP — давление в сечении мениска; γ — свободная поверхностная энергия; θ — угол контакта, характеризующий степень смачивания; r — радиус поры.

При полном смачивании ($\cos\theta = 1$) $\Delta P_{max} = 2\gamma/r$. При небольшом значении r давление ΔP может быть очень большим.

В связи с трудностями определения поверхностной энергии экспериментальным путем для оценки влияния различных сред используют соотношение Юнга:

$$\gamma = \gamma_{т.г} - \gamma_{ж.г}\cos\theta,$$

где $\gamma_{т.г}$ — поверхностная энергия данного материала; $\gamma_{ж.г}$ — поверхностное натяжение жидкости; θ — краевой угол смачивания.

Значение параметра $\gamma_{т.г}$ постоянно, следовательно, γ зависит от поверхностного натяжения жидкости при полном смачивании. При уменьшении γ сопротивление полимера разрушению также должно уменьшаться. При неполном смачивании и увеличении γ изменение значения $\cos\theta$ может привести как к уменьшению, так и к увеличению показателя γ.

Установлено [4—6], что при температурах ниже температуры стеклования кристаллические области физически недоступны для большинства сорбируемых веществ. Анализ данных, полученных для различных образцов, позволил сделать вывод [1] — растворимость S прямо пропорциональна объему аморфной фазы:

$$S = S_a \varphi a,$$

где S_a — растворимость сорбируемого вещества в полностью аморфном полимере; φ — коэффициент, учитывающий долю аморфной фазы в объеме всего материала; a — константа, учитывающая свойства конкретного материала.

В кристаллических полимерах воздействие растворителя локализуется, прежде всего, по границам сферолитов, а иногда и внутри сферолитов между лучами. Это связано с тем, что при кристаллизации в сферолитах упорядочиваются структурные единицы одинакового строения, например в линейных полимерах — линейные молекулы. В этом случае молекулы, содержащие разветвления и посторонние группы, возникающие в результате окисления и других процессов, автоматически выталкиваются из кристаллов и образуют аморфную или менее упорядоченную фазу между сферолитами. Таким образом, происходит концентрация дефектов, по которым начинается процесс разрушения.

При воздействии агрессивных химических сред на полимеры также имеет место химическая деструкция. Анализ результатов исследований [1, 2] показал, что в зависимости от соотношения скоростей диффузии агрессивной среды и химической реакции в полимере деструкция в агрессивных средах может протекать в следующих областях:

внутренней диффузионно-кинетической, где деструкция протекает в реакционной зоне, размер которой со временем увеличивается и в конце концов распространяется на весь объем полимерного материала;

внутренней кинетической, где деструкция протекает с одинаковой скоростью в доступном объеме полимерного изделия;

внешней диффузионно-кинетической, где деструкция протекает в тонком поверхностном слое постоянного размера, который может быть монослоем полимера.

При воздействии агрессивных сред на полимерные композиционные материалы (гетинакс, текстолит и др.) разрушение начинается с поверхности раздела "полимер—наполнитель" вследствие ухудшения их адгезионных свойств, ослабления и нарушения связей между ними. Агрессивная среда может способствовать также вымыванию полимерного связующего. Оба процесса приводят к нарушению структуры композиционного материала. Для определения влияния параметров обработки полимерного материала активными средами на его состояние при действии механической нагрузки исследовали образцы на растяжение после соответствующей химической обработки.

Исследовали широко применяемые в различных отраслях промышленности детали из реактопластов и тер-

мопластичных полимерных материалов: капролона, гетинакса и текстолита. Опыты проводили при постоянных условиях испытаний — сохранялись технология изготовления образцов, а также температура, влажность, скорость и нагрузка одноосного растяжения (ГОСТ 11262—80). Подготовленные образцы выдерживали 5 и 15 ч при нормальной температуре в толуоле [6], после чего они подвергались растяжению (скорость перемещения зажимов нагружающего устройства 12 000 мм/ч).

Исследования показали, что обработка таких полимерных материалов, как капролон, гетинакс, текстолит, активными средами приводит к значительному снижению их прочности. На это указывает снижение предела вынужденной эластичности ($\sigma_{вэ}$) для капролона и разрывного напряжения ($\sigma_р$) для текстолита и гетинакса. Так, при обработке капролона толуолом значение $\sigma_{вэ}$ снижается с 85 до 62 МПа при выдержке 5 ч и до 54 МПа при выдержке 15 ч; для гетинакса при выдержке 5 и 15 ч значение $\sigma_р$ снижается со 118 до 52 и 40 МПа соответственно, для текстолита — со 102 до 53 и 48 МПа соответственно.

Кроме того, из анализа рис. 1—3 следует, что в случае обработки активной средой сокращается время разрушения реактивных полимерных материалов. Кривые предела вынужденной эластичности более пологие, без выраженного экстремума. Это объясняется изменением структуры, которое сопровождается снижением прочности материала. Изменение кривых $\sigma_{вэ}$ для капролона можно объяснить снижением гибкости полимерных цепей материала из-за образования укрупненных кинетических единиц (конгломератов) под воздействием активных сред. Наличие конгломератов ускоряет разрушение, которое идет по слабым местам структуры полимера, т. е. по межконгломератным связям.

При циклических деформациях полимерных материалов и их контактировании с движущимися поверхностями происходит многократное напряжение, что, вероятно, также вносит изменения в процесс разрушения. Однако характер этих изменений при наличии агрессивных сред на сегодняшний день не изучен. Имеются лишь некоторые данные по резинам [1, 2], что связано с их широким использованием в изделиях, где они подвергаются циклическим деформациям в агрессивных средах.

Итак, при механической обработке заготовок из полимерных материалов целесообразно проводить предварительную обработку для повышения эффективности процесса резания. Этот процесс можно рассматривать как процесс разрушения полимерных материалов с магистральной трещиной и образования двух новых поверхностей. И можно предположить, что адсорбция ПАВ снижает сопротивление материала резанию и способствует разрыхлению поверхностных слоев. Образуются зоны предразрушения, которые облегчают деформирование срезаемого слоя материала, что, в свою очередь, повышает производительность обработки и качество обработанной поверхности [3].

Обрабатывать полимерные материалы желательно физически активными веществами. В случае использования химически агрессивных веществ следует выдерживать такие параметры обработки, чтобы процесс происходил во внешней диффузионно-кинетической области.

На основании проведенных экспериментов был разработан соответствующий способ обработки деталей из полимерных материалов [7], суть которого заключается в направленном изменении свойств обрабатываемого материала путем предварительной химической обработки их поверхностного слоя с целью снижения сопротивления разрушению в зоне резания.

В результате обработки возникает такая структура материала, в которой часть химических и межмолекулярных связей разрушена, а другая часть напряжена. Таким образом, имеет место эффект локального охрупчивания части поверхности обрабатываемой детали. После чего деталь

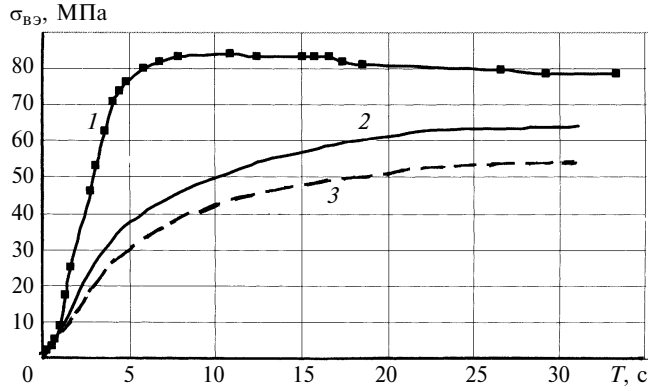


Рис. 1. Изменение предела $\sigma_{вэ}$ вынужденной эластичности образцов из капролона в зависимости от их обработки и времени выдержки в толуоле:
1 — без химической обработки; *2* и *3* — время обработки 5 и 15 ч соответственно

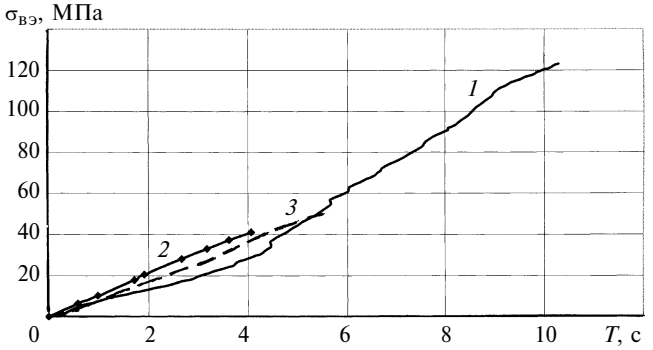


Рис. 2. Изменение предела $\sigma_{вэ}$ вынужденной эластичности образцов из гетинакса в зависимости от их обработки и времени выдержки в толуоле:
1 — без химической обработки; *2* и *3* — время обработки 15 и 5 ч соответственно

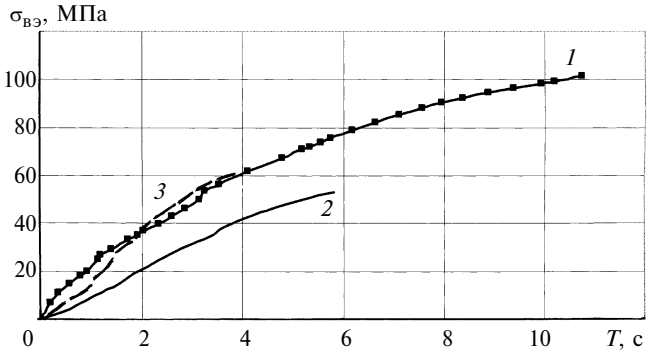


Рис. 3. Изменение предела $\sigma_{вэ}$ вынужденной эластичности образцов из текстолита в зависимости от их обработки и времени выдержки в толуоле:
1 — без химической обработки; *2* и *3* — время обработки 15 и 5 ч соответственно

подвергают механической обработке, например токарной. При этом характер процесса стружкообразования качественно меняется — отделение материала срезаемого слоя происходит преимущественно в результате хрупкого разрушения, так как усилие деформирования снижается из-за охрупчивания. Как известно, энергия хрупкого разрушения значительно меньше энергии, необходимой для пластического разрушения [3, 6]. Различные дефекты в зоне опережающих деформаций образуются при значительно меньших напряжениях, что обеспечивает благоприятные условия для зарождения пластических сдвигов и более стабильное распространение магистральной трещины перед режущим клином вдоль линии среза. Снижение уровня напряженного состояния материала способствует также снижению температуры в зоне резания, что является дополнительным условием для уменьшения шероховатости обработанной поверхности и повышения производительности механической обработки заготовок из полимеров.

Для расширения технологических возможностей обработки деталей из полимерных материалов перед обработкой химическими реагентами на обрабатываемой поверхности следует выполнить глухие отверстия одинаковых размеров. При этом глубина отверстий не должна превышать величину снимаемого слоя при резании, а расстояния между отверстиями, зависящие от используемого химического реагента и плотности материала заготовки, должны быть одинаковыми по всей длине обрабатываемой поверхности и обеспечивать перекрытие зон действия химического реагента, обеспечивая тем самым равномерность распределения реагента. Происходит охрупчивание поверхностного слоя заготовки на необходимую глубину. Продолжительность химической обработки определяется формулой

$$t = \frac{\rho\delta}{v} K,$$

где ρ — плотность материала; δ — толщина снимаемого слоя за один проход резца; v — скорость действия реагента (определяется экспериментальным путем); K — коэффициент сплошности поверхности заготовки.

Наличие поверхностного слоя материала постоянной глубины и степени охрупчивания является предпосылкой улучшения качества обработанной резанием поверхности детали, так как обеспечивается стабильность распространения магистральной трещины перед режущей кромкой инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Манин В. Н., Громов А. Н.** Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л.: Химия, 1980. 248 с.
2. **Зуев Ю. С.** Разрушение полимеров под воздействием агрессивных сред. М.: Химия, 1972. 229 с.
3. **Подураев В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1974. 587 с.
4. **Тагер А. А.** Физикохимия полимеров. М.: Химия, 1978. 544 с.
5. **Бартенев Г. М., Зуев Ю. С.** Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. М.: Химия, 1964. 380 с.
6. **Аскадский А. А., Матвеев Ю. И.** Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983. 248 с.
7. **Пат. 2203183.** Способ обработки деталей из пластмасс.

УДК 530.145.6:53.06

Ю. Г. КАБАЛДИН, академик РИА, С. В. БИЛЕНКО, доктора технических наук,
С. Н. МУРАВЬЕВ, канд. техн. наук (Комсомольский-на-Амуре ГТУ)

Информационная модель самоуправляемого синтеза наноматериалов

Показано, что расположение атомов в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева и их электронное строение определено квантовым характером развития микромира и его эволюцией. Это обусловливает и квантовый механизм образования наносистемы. В связи с этим способность к самосборке изолированных атомов в наносистему будет определяться их квантовым состоянием, информацию о котором несет фрактальная размерность. Предложены нейронная сеть и методика, позволяющие осуществлять самосборку изолированных атомов по их фрактальной размерности в устойчивую наноструктуру. Изложены квантовые механизмы нарушения структурной устойчивости наносистемы при их размере, превышающем 100 нм.

It is shown, that atoms allocation in the Mendeleyev periodic table and their electronic structures are determined by the quantum character of the microcosm development and evolution. This sets conditions for the quantum mechanism of nano-system formation. As a result ability of the insulated atoms for self-assembly into a nano-system will be determined by their quantum state, fractal dimension carries information on the state. Neural network and procedure allowing for realizing insulated atoms assemblage into stable nano-structure by their fractal dimensions are suggested. Nano-system structural instability quantum mechanism is described for the case of their dimension exceeding 100 nm

Последнее десятилетие ознаменовано исследованиями возможности формирования наноструктурных состояний в различных металлах и сплавах [1—4].

В работе [1] отмечается, что наноструктуры могут иметь разнообразные применения. Свойства наноразмерных структур определяются размером, формой и расположение в них всех атомов. В настоящее время не установлены механизмы зарождения и формирования таких структур и неясно, какое точно число атомов может составлять определенную молекулярную структуру. Исследования в области синтеза и применения наноструктурных систем в значительной степени сдерживаются тем, что до сих пор неизвестны принципы взаимодействия и объединения таких структур друг с другом, что не позволяет выработать стратегию получения новых функциональных характеристик.

Интерес к созданию структур с размерами от 10 до 100 нм проявился в 90-х гг. прошлого столетия в связи с обнаружением в таких системах квантовых эффектов. Начало исследованиям в области наноматериалов и нанотехнологий положено лауреатом Нобелевской премии Р. Ф. Фейнманом [5] в лекции "Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики", прочитанной им в 1960 г. в Калифорнийском университете на рождественском обеде Американского физического общества.

В дальнейшем идея конструирования материалов на атомном уровне получила практическое направление. Их упорядочение достигается, прежде всего, путем упорядочения металлических кластеров [6]. Кластеры металлов занимают промежуточное положение между атомами металла и массивным металлом и представляют собой особое состояние металла. В соответствии с общепринятой терминологией [7] кластеры — это частицы, содержащие от 2 до 10^5 связанных друг с другом атомов металла размером от 0,5 до нескольких десятков нанометров.

Кластеры можно рассматривать как макромолекулу с большим числом атомов. В материаловедении строение материалов на мезоуровне формируется наночастицами. Установлено [2], что для многих элементов наночастицы формируются последовательно, путем взаимодействия с первой, второй и третьей координационными сферами. Взаимодействие с первой сферой образует основной кластер, частицы второй и третьей сфер взаимодействуют уже с основным кластером как с макромолекулой. Межкластерное взаимодействие определяет все макросвойства твердых тел.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует общепринятая терминология в области наноматериалов. т. е. говоря о наноструктуре, наносистеме и т. д., имеют в виду, что размер последних не превышает 100 нм.

Установление связи между структурой металлических кластеров и свойствами наноматериалов (наносистем) основано главным образом на анализе электронной структуры и свойств атомов в связи с расположением их в Периодической системе (ПС) химических элементов Д. И. Менделеева. Это обусловлено тем, что особенности электронного строения изолированных атомов в значительной степени определяют свойства кластеров. В связи с этим рассмотрим электронное строение атомов в ПС более подробно.

Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева как отражение квантового характера развития микромира

Классифицируя химические элементы, Д. И. Менделеев открыл периодическое изменение свойств элементов с возрастанием атомного веса [8]. Создав периодическую систему, включившую все известные на тот момент 63 элемента, он предсказал также существование ряда неоткрытых еще элементов — галлия, германия, скандия — и вычислил их атомные веса (в современной формулировке — атомные массы).

Конец XIX и начало XX века ознаменовались великими открытиями: был обнаружен электрон, начала развиваться квантовая механика [9—15]. Это позволило существенно развить основные положения ПС. Характерной особенностью квантовой механики с первых шагов ее создания была тесная связь с идеями и аппаратом классической механики [13]. В частности, предполагалось, что уравнения квантовой механики, представленные в достаточно общей форме, должны преобразовываться при определенных условиях, например при больших массах частиц, в обычные уравнения классической теории. При таком подходе квантовые уравнения должны были приобретать вид и смысл уравнений классической механики. Это предположение названо принципом соответствия и играет фундаментальную роль в квантово-механических построениях [15].

Однако в квантовой механике, при наличии большого числа взаимодействующих подсистем — атомов или молекул, имеют дело с состояниями, в которых можно определенно указать лишь вероятность P_i обнаружения того или иного состояния подсистемы, описываемого волновой функцией ψ_i. Это положение составляет основу квантовой механики [9—12].

В ПС принято электронное строение атома, согласно которому он представляет собой систему [8, 15], содержащую положительно заряженное ядро с зарядом, равным z. Ядро состоит из протонов и нейтронов. Число протонов определяет заряд z ядра, равный атомному номеру, и общее число электронов в нейтральном атоме. Сумма масс протонов и нейтронов ядра обусловливает с учетом небольшого дефекта массы, имеющего место при образовании ядра, атомную массу. С возрастанием атомного номера в результате периодического повторения строения внешних электронных оболочек происходит периодическое изменение структуры и физико-химических свойств элементов.

Оболочки атомов [8, 15], образуемые совокупностью электронов, обладающих одинаковыми главными квантовыми числами: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, обозначаются буквами K, L, M, N, O, P, Q. Главное квантовое число n определяет номер оболочки, которую занимает электрон, и ставится перед буквой, указывающей на орбитальное квантовое число l. Орбитальные квантовые числа 0, 1, 2, 3, 4 обозначаются буквами s, p, d, f, g. Совокупность электронов с одинаковым значением числа l представляет подгруппу данной оболочки. В показателе степени указывается число электронов, занимающих данный энергетический уровень.

Волновое уравнение Э. Шредингера [12] является основным уравнением квантовой механики. Для электрона, движущегося в центральном поле протона, и других одноэлектронных водородоподобных систем уравнение имеет вид:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{dy^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right)+U\Psi=E\Psi, \qquad (1)$$

где h — постоянная Планка; m — масса электрона; Ψ — волновая функция электрона; U — потенциальная энергия электрона; E — полная энергия электрона.

В целом, как справедливо отмечается в работе [8], современные методы квантово-механических расчетов строения атомов по Хартри—Фоку на основе одноэлектронных волновых функций Ψ с учетом обобщенного отталкивания электрона от всех остальных электронов, так же как расчеты по Слейтеру с использованием констант экранирования заряда ядер остовыми электронами, не привели к строгому обоснованию реальной последовательности заполнения электронных оболочек атомов, а следовательно, и к строгому квантово-механическому выводу периодической системы Д. И. Менделеева. Последовательное заполнение электронных оболочек при возрастании заряда z ядра в атомах происходит в соответствии с принципом минимума энергии, принципом Паули и правилом Хунда. Полное решение этой проблемы требует также учета симметрии и направленности внутренних оболочек.

Важность проблемы обусловливает необходимость разработки новых подходов к использованию основных свойств элементов ПС при разработке теории структурообразования наноматериалов. В связи с этим можно предположить, что характер строения ПС, основанный на периодичности электронной структуры атомов в зависимости от их порядковых номеров, обусловлен тем, что атомы квантованы, т. е. их структура определена эволюцией развития Вселенной и, в частности, нашей планеты — Земли. Дело в том, что возраст большинства атомов элементов превосходит возраст Земли [15]. Например, образование атомов основного элемента вселенной — водорода — произошло через 700 тыс. лет после Большого взрыва.

В работе [16] указывается, что электронная структура оболочек атома зависит также и от формы ядра. Если изменяется форма ядра с ростом его массы, то изменяется (деформируется) и потенциальная яма, что изменяет граничные условия для стоячих волн. Существующая концепция [4] "островов стабильности" ядер связана с набором так называемых магических чисел для числа протонов и — отдельно — для числа нейтронов в атомном ядре: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, ... При этих значениях протонная и нейтронная оболочки ядра заполнены, а ядра с такими оболочками более устойчивы. С повышением заряда ядра число нейтронов по сравнению с числом протонов увеличивается и ядро становится неустойчивым. Этот факт известен как α-распад тяжелых ядер.

Приведенные выше литературные данные [16, 4] подтверждают мысль о том, что форма и масса ядра атома, его электронная структура определены эволюцией строения атома и квантовым развитием микромира. Как электрон, так и ядро обладают информацией об этой эволюции, т. е. обладают памятью.

Эволюционный характер образования атомов, их информационные свойства, а также закономерности расположения атомов в ПС и механизм структурообразования наноматериалов следует рассматривать на основе подходов теории синергетики, как науки, изучающей эволюцию открытых систем различного характера [17, 18]. В связи с этим атом следует исследовать как систему, квантовое состояние которой в значительной степени определяется его электронной структурой и структурой ядра.

Информационная модель структурообразования наносистем

В теории синергетики основными являются принципы [18, 19]: минимума производства энтропии; порядка; подчинения. Упорядоченное состояние открытой системы связанно с согласованностью поведения подсистем (атомов, молекул) в результате обмена системы энергией, веществом и информацией с внешней средой. При этом устанавливается определенное соотношение между производством энтропии и устойчивостью системы: состояние системы, при котором достигнуто равновесие, всегда сопровождается снижением производства энтропии.

На основе принципов синергетики можно утверждать, что параметром порядка в ПС является заряд ядра атома [по Д. И. Менделееву — атомный вес (масса)]. Строго детерминирован принцип подчинения. В частности, как отмечалось выше, с увеличением заряда ядра периодически изменяются строение электронных оболочек и размер атома. Движение электронов также квантовано [15]. В связи с изложенным выше можно предполагать, что периодичность свойств в ПС обусловлена самовоспроизводством самоподобных структур в периодах. Таким образом, квантованность электронной структуры атома и его квантовое состояние в целом есть результат эволюции атома, обусловленный квантовым характером развития микромира. В связи с этим образование молекулы, кластера и далее наносистемы в целом следует рассматривать как цепь структурных перестроек (неравновесных фазовых переходов) с образованием новых структурных состояний в результате самоорганизации.

При образовании кластера его электронная структура претерпевает существенные изменения [20], изучение которых актуально для создания наноматериалов с заданными свойствами. Физические характеристики кластеров существенно зависят от сорта атомов, от их числа N, причем сглаживание такой зависимости свидетельствует о переходе материала из кластерного состояния в объемное.

Началом современного этапа физики металлических кластеров следует считать открытие оболочной структуры у кластеров щелочных и редкоземельных металлов, которая во многом напоминает оболочную структуру атомных ядер [20]. Например, для Na были найдены кластеры, обладающие наибольшей устойчивостью: оказалось, что кластеры с некоторыми магическими числами $N = 8$, 18, 20, 34, 40, ... имеют наибольшую энергию связи. Наиболее устойчивыми кластерами являются те, у которых определенные уровни (оболочки) полностью заполнены. Обнаружен периодический характер изменения свойств кластера с ростом числа частиц. Теоретически это явление объясняется свойством валентных электронов покидать свои атомы (делокализовываться) и образовывать зону проводимости. Оказалось, что эти обобществленные электроны наиболее от-

ветственны за энергетическую структуру кластера. Более того, их поведение определяет большинство коллективных свойств кластеров, т. е. обобществленные электроны принадлежат всему кластеру.

Выше указывалось, что энергетическое состояние электронов и изолированного атома определяется набором квантовых чисел. Электроны с одинаковыми значениями n и l имеют одинаковые энергии и образуют оболочку. При сближении двух атомов электронная структура каждого из них преобразуется: дискретные уровни энергии сдвигаются, расщепляются и группируются. Часть электронов, находящихся на верхнем уровне, может обобществляться, при этом они двигаются по объединенному объему двух атомов. Когда число атомов увеличивается, увеличивается и число обобществленных валентных электронов.

Энергетический спектр обобществленных валентных электронов определяется размером и формой кластера и взаимным расположением в нем атомов [20]. Когда все состояния определенного уровня энергии заполняются электронами, образуется замкнутая электронная оболочка. Кластер представляет собой наиболее компактную систему с наибольшей энергией связи.

Таким образом, положение атома в кластере определяется не только соседними атомами, но и всеми другими атомами, принимающими участие в его образовании, т. е. создается единое квантовое состояние и наблюдается согласованность между отдельными частями (атомами) кластера. Иначе говоря, единое квантовое состояние с чередующимися минимумами и максимумами волновых функций является остовом, который определяет электронную оболочку кластера. Если перекрытие волновых функций мало, то и взаимодействие электронов слабое. Сильнее всего перекрываются волновые функции валентных электронов, в результате их взаимодействие оказывается высоким [15].

Аналогичные представления развиваются в работах [8, 20]. Приближение внешних электронов к положительно заряженному атомному ядру, "своему" или "чужому", вызывает уменьшение энергии системы. Сближение электронов с соседними ядрами понижает потенциальную энергию, так же как и сближение со "своим" ядром. Кинетическая энергия электронов при этом не увеличивается, так как область распространения электронов не сужается. Поэтому полная энергия системы при сближении атомов уменьшается. Уменьшение энергии системы при более плотной "упаковке" атомов означает появление сил притяжения между атомами. При таком сближении атомов потенциальные ямы поверху сливаются. Если в "области слияния" имеются занятые электронные уровни, то соответствующие электроны "обобществляются", т. е. принадлежат уже всему кристаллу. Так возникает металлическая связь. Следовательно, для появления такой связи надо, чтобы в атоме присутствовали "слабосвязанные" электроны.

Следует отметить, что расчет полной энергии электронов при объединении их атомов можно проводить на основе уравнения (1) З. Шредингера. Параметр E в нем определяет дискретные значения энергии в уровнях [13], т. е. в потенциальной яме. Расстояние между уровнями и энергия самого нижнего уровня зависят от локализации частицы (электрона). Расстояние между уровнями зависит от массы частицы, в частности, с ее ростом уровни сближаются. В общем случае волновая функция Ψ может иметь сложную зависимость от времени, в частности, при сближении атомов или молекул. Решение уравнения (1) оказывается сложным [13].

Возникают также вопросы, какими должны быть электронные структуры атомов, молекул или кластеров и действительно ли законы Природы запрещают те или иные формы структур. По-видимому, важным элементом в динамике атомов и в понимании механизма образования кластеров оказывается квантовое состояние изолированных атомов. Атом, как и любая другая квантовая система, может находиться в различном квантовом состоянии. В связи с этим устойчивость атома обусловлена нахождением его в едином квантовом состоянии, что означает согласованное взаимодействие его отдельных составляющих (ядра, электронов): изменение в одной части приводит к мгновенному изменению в другой. При объединении атомов в молекулу образуется новое единое квантовое состояние, что определяет устойчивость молекулы либо кластера.

Основная идея разработанного нами механизма структурообразования молекул, кластеров и т. д. с позиции теории синергетики заключается в том, что указанные структурные (квантовые) переходы связаны с коллективным взаимодействием как отдельных частей атома, так и кластеров и наносистем в целом в результате передачи информации квантового состояния изолированных атомов при их объединении и переходом в новое квантовое состояние. Выше уже указывалось, что решающую роль в формировании электронной структуры молекул и кластеров играет коллективное (когерентное) взаимодействие валентных электронов атомов. Коллективные эффекты являются характерной чертой поведения синергетических систем. В связи с этим кластер следует рассматривать как диссипативную структуру, которая является результатом самоорганизации при структурных переходах и должна обладать фрактальными свойствами. Одним из важнейших свойств фракталов является то, что они обладают информационными свойствами. По определению Б. Мандельброта [21], фрактал — структура, состоящая из частей, подобных целому.

Как следует из изложенного выше, квантовое состояние системы — это самосогласованность ее отдельных частей. Следовательно, фракталы — отражение квантовых свойств микромира, его эволюции и самоподобия. Квантовый характер образования кластера — это также проявление коллективных свойств при объединении атомов, поэтому устойчивость и самоподобие кластера можно выразить количественной характеристикой — фрактальной размерностью. Образование диссипативной структуры — это неравновесный фазовый переход. Согласно Г. Хакену [17] при этом система сохраняет память (информацию), которая передается с помощью диссипативных структур в процессе структурных перестроек (эволюции). Выше уже указывалось, что электронная оболочка и ядро атома хранят инфор-

мацию о происшедшей эволюции, т. е. квантовое состояние атома обладает памятью. Поэтому фрактальная размерность кластера несет информацию о его квантовом состоянии при его формировании и является как бы мостиком между атомом, молекулой и кластером при структурных перестройках в наносистему.

Динамическая предыстория возникновения (эволюции) атомов позволяет применять методы нелинейной динамики в области геометрических свойств структур. Дело в том, что устойчивость наноструктур определяется не только прочностью межатомного взаимодействия, но и их структурной организацией. Примером тому является структурная организация фуллеренов, построенных на основе ячеек пятиугольной и шестиугольной форм [1]. Это означает включение в эволюционный характер развития атомов и естественных наноструктур нового важного элемента — хаоса. Иначе говоря, образованию регулярных структур с "правильной симметрией" предшествует хаотическое поведение системы. Трехмерный характер структур для образования структурного хаоса является необходимым условием [18]. Свойство самоподобного преобразования структуры может быть заложено генетическим кодом [12], однако и сами структуры должны обладать свойствами самоподобия.

Таким образом, на основе принципов синергетики и квантового характера взаимодействия атомов при структурных перестройках можно сформулировать информационную модель структурообразования наносистем (молекул, кластеров и т. д.). Суть ее заключается в следующем. При объединении атомов и обобществлении валентных электронов происходит перекрытие волновых функций ядра и электронов атомов, в результате они обмениваются информацией и новые структуры (молекула, кластер) сохраняют информацию квантового состояния. Эта информация передается следующей структуре при дальнейших переходах (т. е. при росте кластера), которые осуществляются с уменьшением энергии в наносистеме и переходом ее в новое квантовое состояние, что обеспечивает ее устойчивость. При этом фрактальная размерность образующихся новых структур, а следовательно и информация в них, возрастают. Параметром порядка выступает электрическое поле ядер и электронов, находящихся на внутренних оболочках, оно же является информатором, подающим сигнал (информацию) для коллективного взаимодействия (обобществления) валентных электронов. Кластер формируется совместными усилиями всех атомов в результате обмена информацией между подсистемами (атомами, молекулами). Следует, однако, отметить, что при объединении атомов с различным квантовым состоянием, а также при редукции (коллапсе) их волновых функций информация может теряться и устойчивость наносистем снижается.

Подходы синергетики и теория фракталов дают возможность прогнозировать свойства наносистем. В литературе указывается [1—4], что устойчивость наносистем нарушается при их размере $\geqslant$ 100 нм. На рис. 1, *а* приведены зависимости фрактальной размерности наносистем (наночастиц) элементов ПС от размера *d*.

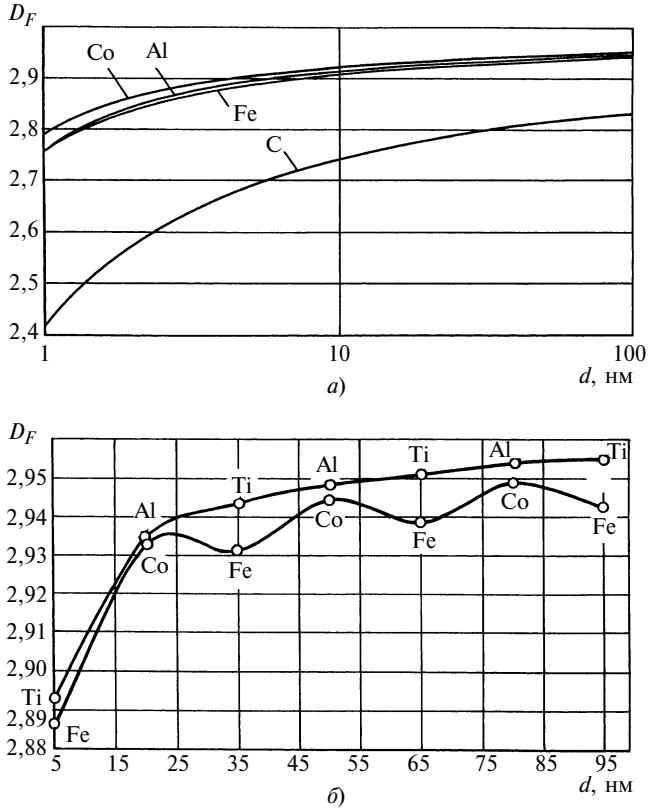


Рис. 1. Зависимости фрактальной размерности D_F от размера *d* для кластеров Fe—Al—Co—C (*а*) и Fe—Co, Ti—Al (*б*)

Фрактальную размерность D_F определяли, исходя из зависимости [22] $M \approx d^{D_F}$, где *d* — размер кластера.

Как видно из рис. 1, *а*, фрактальная размерность вначале (при малом *d*) растет быстро, затем значения D_F стабилизируются и приближаются к трем. В целом фрактальная размерность атомов находится в пределах $2 < D_F < 3$. Это свидетельствует о том, что наночастицы являются трехмерными структурами.

На рис. 1, *б* приведены зависимости фрактальной размерности D_F от размера *d* наносистемы. Зависимость D_F от *d* системы Fe—Co носит периодический характер, что объясняется изменением сортности атомов, а следовательно, их электронной структуры и, по-видимому, некоторой потерей информации. В связи с этим можно полагать, что обмен информацией между атомами без ее потери и устойчивость наносистемы будут достигаться при объединении атомов с самоподобным квантовым состоянием, информацию о котором несет фрактальная размерность D_F. Поэтому способность к самосборке наночастиц контролируется как электронной структурой атома, определяющей его квантовое состояние, так и фрактальной размерностью изолированных атомов. На рис. 1, *б* видно, что зависимость D_F—*d* системы Ti—Al имеет уже монотонный характер, что обусловлено одинаковой фрактальной размерностью атомов Ti и Al и самоподобным идентичным квантовым состоянием.

На рис. 2 приведены значения информационной энтропии Шеннона $S_и$ [19] электронных оболочек атомов

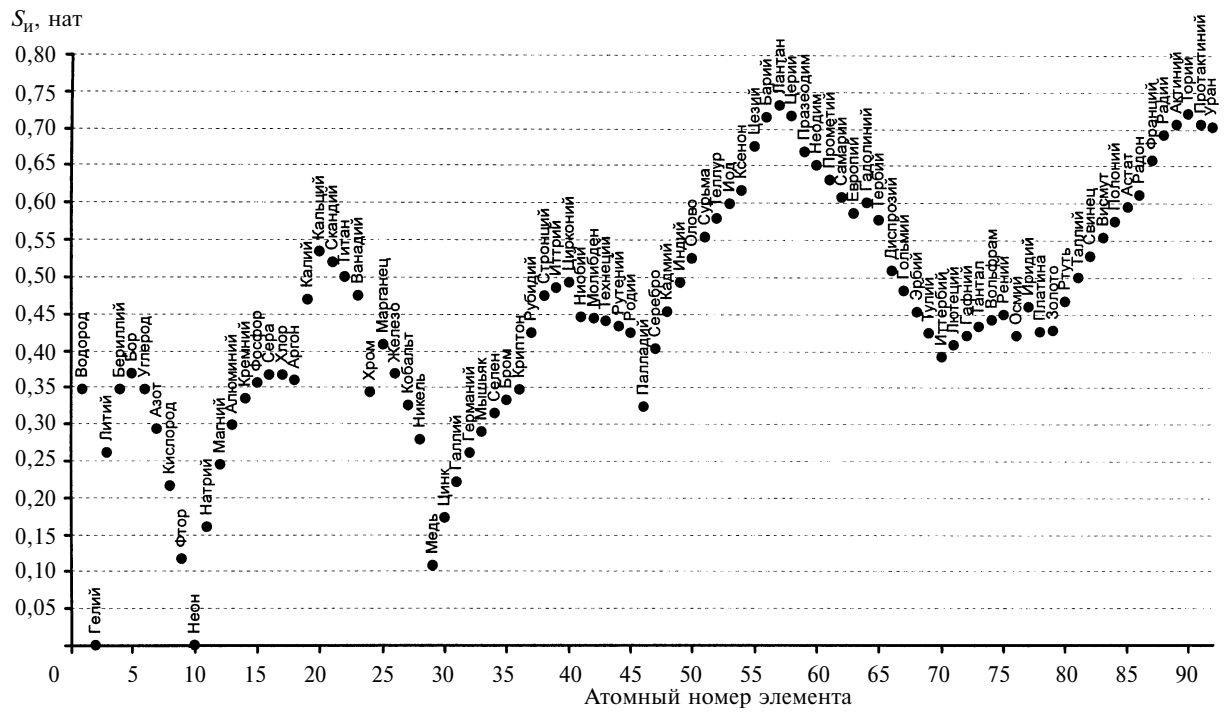


Рис. 2. Значения информационной энтропии $S_и$ заполненности электронных слоев элементов в зависимости от атомного номера

от атомного номера элемента. Как видим, зависимость $S_и$ от атомного номера имеет периодический характер, что свидетельствует о том, что атомы химических элементов обладают информацией и энтропией в различной степени.

Периодический характер зависимости от заряда ядер атомов и информационной энтропии $S_и$ электронных оболочек атомов от их порядкового номера обусловлен периодическим ростом энтропии в периодах и последующим снижением ее производства. Это связано с тем, что при росте заряда атома увеличивается степень заполнения электронами энергетических уровней в периодах, что вызывает рост энтропии в атомах. Снижение производства энтропии обусловлено тем, что ядро и электроны составляют единое целое (единое квантовое состояние). Это обстоятельство определяет периодичность зависимости $S_и$ от порядкового номера и появление малых и больших периодов (см. рис. 2).

Фрактальная размерность соответствует числу степеней свободы системы в фазовом пространстве [21]. Следовательно, фрактальная размерность наносистемы $D_F \approx 3$ указывает на то, что создаются условия для стуктурного хаоса [19]. Поэтому с увеличением размера свыше 100 нм вследствие развития флуктуации наносистема становится неустойчивой и ее структура переходит в хаотическое состояние. По-видимому, при этом создается сложное квантовое состояние. Это состояние, формирующееся при образовании сложных молекул либо кластеров, и взаимодействие с внешней средой обусловливают возможность редукции квантового состояния молекулы или кластера. Известно, что кластеры обладают высокой химической активностью и способностью вступать в реакцию без какой-либо дополнительной энергии [1]. Избыточность энергии таких частиц объясняется нескомпенсированностью связей их поверхностных атомов [23]. Доля поверхностных атомов у наночастиц больше, чем у веществ, находящихся в компактном состоянии. Поэтому отдельные атомы могут выпадать из квантового единства с кластером, если они локализуются в отдельных молекулах при взаимодействии с внешней средой и уже не принадлежат кластеру (наносистеме). Такие молекулы, по-видимому, перестают расти, обмениваться электронами (информацией) с другими молекулами и в конце концов они распадаются по мере роста наносистемы. Таков, на наш взгляд, возможный квантовый механизм нарушения устойчивости наноструктуры при ее размерах, превышающих 100 нм.

Возможен и другой механизм структурной неустойчивости наносистемы как квантовой системы при росте ее размеров свыше 100 нм. Дело в том, что при увеличении размеров наноструктуры ее энергия в соответствии со знаменитым уравнением А. Эйнштейна $E = mc^2$ [19] возрастает. Такая трактовка снижения устойчивости наноструктуры через флуктуации энергии в связи с ее ростом, вплоть до ее разрушения, хорошо согласуется с ядерным явлением, т. е. радиоактивностью атомов при росте массы ядра либо изменением его формы [16], что отмечалось выше. В случае α- и β-радиоактивности исходный атом в ходе этого процесса трансформируется в новый атом другого химического типа. В случае γ-радиоактивности такие трансформации отсутствуют. Атом при этом не меняет своей химической природы, но переходит с одного уровня энергии на другой. При этом важен временной аспект, т. е. время распада может длиться от $\approx 10^{-24}$ с до миллиарда лет и более [15]. С позиции квантовой механики это связано с тем, что квантовый мир является вероятностным. Не все атомы распадаются к некоторому характерному моменту, по-

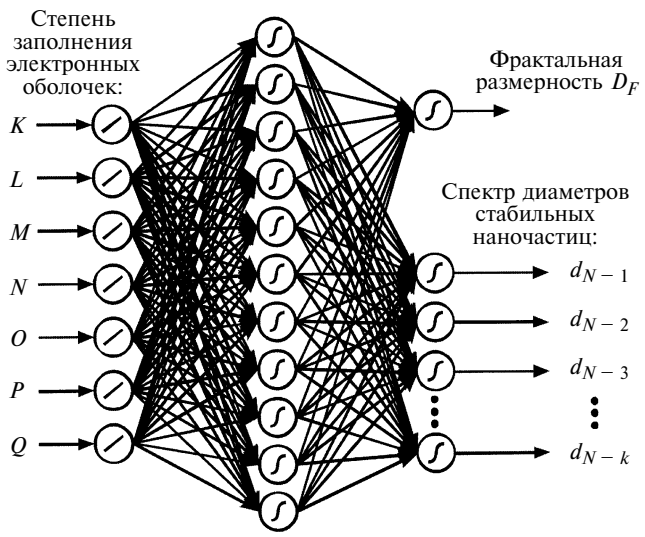


Рис. 3. Нейронная сеть самосборки устойчивых кластеров

скольку распад идентичных атомов в ансамбле будет происходить в различное время, т. е. случайно.

Таким образом, квантовый механизм формирования наноструктуры предполагает, что вместо набора возможных конфигураций составляющих ее атомов, молекул и кластеров существует дискретный спектр связанных квантовых состояний.

Следует также еще раз подчеркнуть определяющую роль при синтезе металлических кластеров коллективного взаимодействия валентных электронов. Дело в том, что они влияют не только на электронную структуру кластера, его новое квантовое состояние, но и на характер поведения при взаимодействии с внешними полями (например, электромагнитными) [20]. Следовательно, степень коллективизации валентных электронов определяет не только квантовое состояние наносистемы, но и ее реакцию на внешнее возмущение.

Разработанный нами информационный механизм формирования наносистем хорошо согласуется с новым научным направлением в квантовой механике — квантовой теорией информации [24, 25], базирующейся на ее основных положениях, в частности на нелокальности квантового мира. Согласно этой теории квантовое состояние системы — информационный ресурс. Информация, содержащаяся в квантовом состоянии системы, классифицируется специальным термином — квантовая информация, передающаяся в виде квантов по каналам связи. Передача квантового состояния некоторой квантовой системы (атома) другой квантовой системе получила название квантовой телепортации [24, 25]. При этом две системы, которые не взаимодействуют друг с другом вследствие различия в начальном квантовом состоянии, становятся "перепутанными". Для возможности передачи информации от одного квантового состояния к другому осуществляется очищение от "перепутывания" [25].

Следовательно, если при объединении (сборке) в молекулу или кластер информация квантового состояния изолированных атомов не передается при росте наносистемы, то она оказывается неспособной к эволюции в устойчивую наносистему.

В связи с изложенным можно предполагать, что и новые функциональные свойства наносистем (проводимость, твердость, прочность и т. д.) будут, на наш взгляд, в значительной степени определяться как квантовым состоянием изолированных атомов, так и новым квантовым состоянием наносистемы в целом. Как указывалось выше, квантовое состояние наносистемы будет определять ее реакцию и на внешнее воздействие.

На рис. 3 приведена нейронная сеть, позволяющая, исходя из электронной структуры изолированных атомов (энергии электронов), а следовательно, их квантового состояния и расчета фрактальной размерности наносистемы при различных ее размерах, оценить ее устойчивость в условиях самоуправляемого синтеза.

Заключение

Исследованы квантовый механизм образования наноструктур и проблема их структурной устойчивости. Показано, что электронное строение, размер и форма ядра атома обусловлены квантовым характером развития микромира, его эволюцией. Процесс объединения атомов в молекулу или кластер носит обменный характер и определяется квантовым состоянием отдельных атомов и сопровождается обобществлением "слабосвязанных" валентных электронов с уменьшением общей энергии в системе. Коллективизацию валентных электронов, образование молекул или кластера следует рассматривать как результат самоорганизации системы, образования и распада квантовых состояний, перехода системы в новое устойчивое квантовое состояние с образованием диссипативных структур, обладающих фрактальными свойствами.

Квантовый характер образования молекул или кластеров — это проявление коллективных эффектов при самосборке атомов, которые свойственны синергетическим системам. Поэтому самоподобие и устойчивость кластеров (наносистем) можно выразить количественной характеристикой — фрактальной размерностью. Атом в электронной оболочке и ядре хранит информацию о произошедшей эволюции, т. е. обладает памятью. В связи с этим фрактальная размерность несет информацию о квантовом состоянии молекулы или кластера при обмене информацией изолированных атомов. Зависимость фрактальной размерности D_F от размера d кластера при объединении односортных (самоподобных) атомов носит монотонный сглаженных характер, увеличиваясь с ростом его размера, что свидетельствует о формировании единого квантового состояния. При объединении атомов различной сортности, а следовательно, с различным квантовым состоянием зависимость D_F от размера наноструктуры имеет периодический характер, устойчивость системы — низкая. При объединении изолированных атомов с самоподобным идентичным квантовым состоянием, а следовательно, с одинаковой фрактальной размерностью (например, атомов титана и алюминия) зависимость D_F от размера наноструктуры является сглаженной (как и при объединении атомов одной сортности). В связи с этим способность изолированных атомов к самосборке в устойчи-

вую молекулу или кластер будет определяться, прежде всего, квантовым состоянием отдельных атомов, информацию о котором несет фрактальная размерность. По мере увеличения размеров наноструктуры фрактальная размерность приближается к трем. Поэтому увеличение числа степеней свободы с ростом размера наносистемы свыше 100 нм и ее энергии способствует переходу ее в хаотическое состояние — устойчивость наноструктуры снижается. Разработана нейронная сеть, позволяющая осуществить самосборку изолированных атомов исходя из их электронной структуры, а следовательно, квантового состояния, с оценкой фрактальной размерности наноструктуры при различных ее размерах с построением зависимости D_F от размера d наноструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нанотехнология** в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований: Пер. с англ. / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и В. Аливисатоса. М.: Мир, 2002. 292 с.
2. **Гречихин Л. И.** Компьютерное моделирование нанотехнологий получения конструкционных, материалов // Вестник машиностроения. 2006. № 12. С. 17—20.
3. **Андриевский Р. А., Рогуля А. В.** Наноструктурные материалы. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 192 с.
4. **Иванова В. С.** Введение в междисциплинарное материаловедение. М.: Сайнс-пресс, 2005. 208 с.
5. **Фейнман Р. Ф.** Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Российский химический журнал, 2002. № 5. С. 4—7.
6. **Петров Ю. И.** Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986. 366 с.
7. **Шека Е. Ф.** Квантовая нанотехнология и квантовая химия // Российский химический журнал. 2002. № 5. С. 15—21.
8. **Григорович В. К.** Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука, 1988. 296 с.
9. **Эйнштейн А.** Квантовая механика и действительность // Собр. науч. тр.: В 4 т. М.: Наука, 1966. Т. 2. 236 с.
10. **Бор Н.** Возникновение квантовой механики // Избр. науч. тр. В 2 т. М.: Наука, 1971. Т. 2. 156 с.
11. **Гейзенберг В.** Физические принципы квантовой механики. М.: НИЦ РХД, 2002. 326 с.
12. **Шредингер Э.** Что такое жизнь? М.: Атомиздат, 1972. 156 с.
13. **Степанов Н. Ф.** Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001. 519 с.
14. **Де Бройль Л.** Соотношение неопределенности Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М.: Мир, 1986. 201 с.
15. **Голдин Л. Л., Новикова Л. И.** Квантовая физика. Вводный курс. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 496 с.
16. **Захарова В. П.** Еще раз об атомах и ядрах // Изв. вузов. Физика. 2003. № 1. С. 5—8.
17. **Атомвакансное** состояние в кристаллах / В. Е. Панин, В. Г. Егорушкин и др. // Изв. вузов. Физика. 1987. № 1. С. 216.
18. **Пригожин И. Р.** От классического хаоса к квантовому // Природа. 1993. № 12. С. 13—21.
19. **Хакен Г.** Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига, 2005. 248 с.
20. **Иванов В. К.** Электронные свойства кластеров // Соровский образовательный журнал. 1999. № 8. С. 97—102.
21. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. Сан-Франциско. Фримен, 1982. 490 с.
22. **Смирнов Б. М.** Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 315 с.
23. **Васильев М. А.** Релаксация атомной структуры поверхности (обзор) // Металлофизика. 1993. № 3. Т. 13. С. 83—97.
24. **Холева А. С.** Введение в квантовую информацию. М.: МЦНМО, 2002. 128 с.
25. **Баумеcтер Д., Экерт А., Цайлингер А.** Физика квантовой информации. М.: Постмаркет, 2002. 376 с.

УДК 621.9.048

Д. Н. КОРОТАЕВ, канд. техн. наук,
(Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск)

Выбор оптимального способа упрочнения прецизионных поверхностей трения

Представлен вариант выбора оптимального способа упрочнения и восстановления поверхностей трения. Показано, что среди прогрессивных методов обработки поверхностей для формирования необходимых эксплуатационных свойств наиболее эффективным является электроискровое легирование.

Friction surfaces strengthening and refacing effective techniques alternate is described. It is shown, that electric-spark alloying is the most effective among prospective surface treatment processes aimed at forming necessary operating abilities.

В современных условиях разнообразия способов упрочнения и восстановления поверхностей прецизионных пар трения задача выбора эффективного и оптимального варианта является актуальной для процессов производства и ремонта деталей машин.

В качестве объекта исследования рассматривается прецизионная деталь топливного насоса высокого давления (ТНВД) — плунжер, основным дефектом, лимитирующим ресурс которого является абразивный износ [1]. Источники эксплуатационной информации (документы учета наработок, повреждений и отказов элементов) показывают, что на долю плунжера ТНВД приходится 21 % отказов [1].

Технологические возможности обработки металлических поверхностей значительно расширяются с применением высококонцентрированных потоков энергии. Анализ, проведенный на основании опубликованных данных ремонтных предприятий [2], позволил выделить ряд наиболее прогрессивных способов упрочнения и восстановления прецизионных деталей: лазерная обработка, электроискровое легирование, плазменное напыление, ионная имплантация, нанесение гальванических покрытий. Для выбора способа упрочнения поверхности использована методика, предлагаемая специалистами технического университета Спецстроя РФ [3]. Данная методика включает следующие этапы:

1. Определение возможных способов упрочнения прецизионных деталей.

Таблица 1

Оценка степени влияния показателей способов упрочнения на характеристики обрабатываемых поверхностей

Упрочняемые поверхности плунжеров		Взаимосвязи	Способ упрочнения: электроискровое легирование	
Шифр	Характеристика		Шифр	Характеристика способа
1.1	Износостойкость поверхности		*Сильные стороны*	
			2.1	Отсутствие нагрева детали в процессе обработки
1.2	Микротвердость		2.2	Получение заданных эксплуатационных свойств
1.3	Прочность сцепления покрытия		2.3	Возможность восстановления размеров деталей
			Слабые стороны	
1.4	Толщина (глубина) упрочненного слоя		2.4	Малая толщина легированного слоя
1.5	Ресурс детали		2.5	Наличие остаточных напряжений в поверхностном слое
			2.6	Большая шероховатость покрытия
			2.7	Низкая производительность

2. Выявление сильных и слабых сторон каждого из способов: к сильным сторонам каждого способа относятся показатели, увеличивающие ресурс упрочняемой детали; к слабым — факторы, снижающие качество работ, увеличивающие стоимость обработки, непредвиденные затраты и т. д.

3. Определение степени влияния сильных и слабых факторов каждого из способов на характеристики упрочненных деталей. Для этого строятся графы влияния показателей способов упрочнения на соответствующие характеристики обрабатываемых деталей. Общее представление связей влияния способов упрочнения (на примере электроискрового легирования) на характеристики модифицируемых деталей (на примере плунжеров ТНВД) отражено в табл. 1.

Степень влияния факторов способов упрочнения деталей оценивается коэффициентом влияния

$$K_{\text{вл}} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i,\,\text{п}} \Phi_{i,\,\text{п}} - \sum_{j=1}^{k} \beta_{j,\,\text{о}} \Phi_{j,\,\text{о}} \to \max,$$

где $\Phi_{i,\,\text{п}}$ — i-й фактор, оказывающий положительное влияние на характеристики детали; $\alpha_{i,\,\text{п}}$ — коэффициент значимости i-го фактора; $\Phi_{j,\,\text{о}}$ — j-й фактор, оказывающий отрицательное влияние на характеристики; $\beta_{j,\,\text{о}}$ — коэффициент значимости j-го фактора; n — число положительных факторов; k — число отрицательных факторов.

Для приведенного примера (см. табл. 1)

$$K_{\text{вл}} = 2 + 3 + 2 - 2 - 1 - 1 - 1 = 2.$$

В данном случае коэффициент влияния рассчитывался без учета показателей $\alpha_{i,\,\text{п}}$ и $\beta_{j,\,\text{о}}$. Этот коэффициент используется для обобщенной оценки степени влияния факторов, так как он учитывает лишь разницу между положительными и отрицательными связями способа упрочнения и характеристиками детали.

4. Ранжирование сильных и слабых сторон того или иного способа по степени их значимости. Необходим расчет коэффициентов значимости ($\alpha_{i,\,\text{п}}$ и $\beta_{j,\,\text{о}}$) каждого из способов по формулам:

$$\alpha_{i,\,\text{п}} = \frac{m\Phi_i}{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} m_{ij}}; \quad \beta_{j,\,\text{о}} = \frac{m\Phi_j}{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} m_{ij}}.$$

В рассматриваемом примере коэффициент значимости фактора $\Phi_{2.1}$ будет

$$\alpha_{2.1} = \frac{2}{2+3+2+2+1+1+1} = \frac{2}{12} = 0{,}17.$$

Таблица 2

Рассчет коэффициентов значимости характеристик упрочненных деталей

Показатель	Износостойкость (И)	Микротвердость (М)	Сцепляемость (С)	Толщина (Т)	Ресурс (Р)	$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n}\gamma_{ij}$	γ
Износостойкость (И)	—	2	2	2	2	8	0,4
Микротвердость (М)	0	—	2	2	2	6	0,3
Сцепляемость (С)	0	0	—	1	1	2	0,1
Толщина (Т)	0	0	1	—	1	2	0,1
Ресурс (Р)	0	0	1	1	—	2	0,1

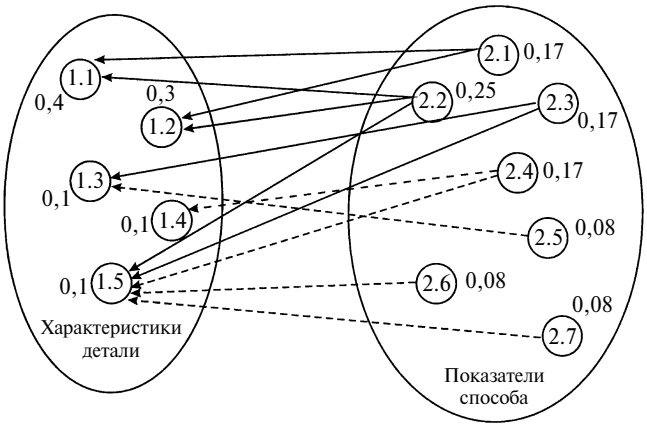


Таблица 3

Расчетные показатели

Способ обработки	Показатель	
	$K_{вл}$	$R_с$
Лазерная обработка	−1	0,052
Электроискровое легирование	2	0,343
Плазменное напыление	1	0,24
Ионная имплантация	0	0,01
Гальванические покрытия	0	0,03

Аналогично для других факторов: $\alpha_{2.2} = 3/12 = 0{,}25$; $\alpha_{2.3} = 2/12 = 0{,}17$; $\alpha_{2.4} = 2/12 = 0{,}17$; $\alpha_{2.5} = 1/12 = 0{,}08$; $\alpha_{2.6} = 1/12 = 0{,}08$; $\alpha_{2.7} = 1/12 = 0{,}08$.

5. Определение ранга $R_с$ значимости каждого способа упрочнения деталей с учетом рассчитанных на предыдущем этапе показателей α_i и β_j. Кроме того, необходимо учитывать важность характеристик обработанных деталей согласно методу относительных предпочтений [3].

Показатели характеристик упрочненных деталей необходимо расположить в последовательности убывания их важности: на первое место ставится наиболее важный показатель, на последнее — наименее важный т. е. строится ряд предпочтений, в котором между равноценными показателями $П_i$ и $П_j$ ставится знак равенства ($П_i = П_j$); если $П_i$ важнее $П_j$, между ними ставится знак предпочтения ($П_i > П_j$); в противном случае $П_i < П_j$. Попарно сравниваются все показатели, при этом каждой паре присваивается показатель предпочтения r_{ij}: при $П_i > П_j$ — $r_{ij} = 2$; при $П_i = П_j$ — $r_{ij} = 1$; при $П_i < П_j$ — $r_{ij} = 0$. Приведенные в табл. 1 характеристики имеют следующие приоритеты: износостойкость (И) > микротвердость (М) > сцепляемость (С) = толщина (Т) = ресурс (Р). Данное выражение дает возможность рассчитать коэффициенты γ значимости (табл. 2). Просуммировав показатели предпочтения для всех строк и столбцов, получаем $\Sigma\Sigma\gamma_{ij} = 8 + 6 + 2 + 2 + 2 = 20$.

Важность показателей γ определяется из соотношений: $\gamma_{1.1} = 8/20 = 0{,}4$; $\gamma_{1.2} = 6/20 = 0{,}3$; $\gamma_{1.3} = 2/20 = 0{,}1$; $\gamma_{1.4} = 2/20 = 0{,}1$; $\gamma_{1.5} = 2/20 = 0{,}1$.

По известным характеристикам упрочненных деталей рассчитывается ранг (значимость) каждого способа упрочнения по формуле

$$R_с = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \gamma - \sum_{j=1}^{k} \beta_j \gamma.$$

Проведем расчет показателя $R_с$ для электроискрового легирования:

$$R_с = 0{,}17(0{,}4 + 0{,}3) + 0{,}25(0{,}4 + 0{,}3 + 0{,}1) + 0{,}17(0{,}1 + 0{,}1) - 0{,}17(0{,}1 + 0{,}1) - 0{,}08(0{,}1) - 0{,}08(0{,}1) - 0{,}08(0{,}1) = 0{,}343.$$

Аналогично для каждого способа упрочнения определяются ранг (значимость) и коэффициент влияния (рисунок).

Результаты расчета показателей $K_{вл}$ и $R_с$ для рассматриваемых способов обработки поверхностей приведены в табл. 3.

Анализ табл. 3 позволяет сделать вывод о том, что из рассматриваемых способов упрочнения и восстановления изнашиваемых деталей (плунжеров ТНВД) для конкретных производственных условий оптимальным методом обработки является электроискровое легирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Башуров А. Г., Балычев Р. Л.** Статистическое исследование функциональной надежности топливной аппаратуры дизелей // Изв. вузов. Машиностроение. № 4. 2000. С. 65—69.

2. **Батищев А. Н., Голубев И. Г., Лялякин В. П.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники. М.: Информагротех, 1995. 296 с.

3. **Серкин В. В., Кравченко И. Н.** Методика обоснования оптимального способа восстановления деталей строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. 2003. № 1. С. 39—41.

Открытое Акционерное Общество АлмазИнструмент
Т/ф: (48134) 6-42-53, 4-04-00, 6-44-01
e-mail: mktg@almaz-i.ru www.almaz-i.ru
Адрес: 216500, Россия, Смоленская обл., г. Рославль, ул. Ленина, д. 3

ОАО «Алмазинструмент», специализируясь на разработке, изготовлении и поставках широкого спектра алмазного инструмента, приглашает к сотрудничеству предприятия РФ и других стран СНГ, а также региональных представителей и предлагает:

• Алмазный правящий инструмент из природных и синтетических алмазов

• Алмазный инструмент, изготовленный методом гальваностегии

Возможно изготовление нестандартного инструмента по чертежам и эскизам заказчика.

УДК 621.9.079:621.892

В. Н. ЛАТЫШЕВ, А. Г. НАУМОВ, доктора технических наук,
В. С. РАДНЮК, канд. техн. наук (Ивановский ГУ),
В. В. ПОДГОРКОВ, д-р техн. наук ГЭУ, г. Иваново)

К вопросу о проникновении СОТС на контактные площадки при резании металлов[1]

Представлены результаты исследований по изучению механизмов проникновения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в зону контакта инструмента с обрабатываемым материалом. На примере использования в качестве СОТС магнитных микрокапсул рассмотрены методы активации их проникающей способности. Показаны возможности применения экологически безопасных твердофазных смазочных сред, предварительно сформированных на поверхности материала.

Investigation results of the cooling lubricants penetration mechanism into the instrument–work material contact areas are covered. Considering an example of using magnetic microcorpuscles as cooling lubricant, penetration capability activation method is described. Application possibility of environmentally conscious solid-phase lubrication medium preformed on the material surface is shown.

Влияние внешних смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на процессы резания и изнашивания режущего инструмента возможно лишь при условии их проникновения на поверхности контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом. В настоящее время механизм проникновения СОТС является предметом научных дискуссий.

Проникновение СОТС может осуществляться по сети капилляров, возникающих между стружкой и инструментом (рис. 1, *а*), по полостям, образующимся вследствие периодических срывов нароста (рис. 1, *б*), по зазорам, которые получаются из-за нарушения плотности контакта вследствие колебаний инструмента и заготовки (рис. 1, *в*), а также по дефектам деформируемого материала стружки (рис. 1, *г*) [1] путем диффузии.

При небольших скоростях резания прилегание контактных поверхностей режущего инструмента и обрабатываемого материала не одинаковое. Контактная зона представляет собой сеть капилляров, размеры которых могут составлять от десятых долей до нескольких десятков микрометров.

Периодическое торможение и остановка отдельных объемов срезаемого слоя металла на поверхности инструмента вызывают образование вакуумных полостей, способствующих проникновению СОТС в зону контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом. На рис. 2 приведена микрофотография корня стружки, образованной при точении детали из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т резцом из быстрорежущей стали Р18, так называемой стружки скалывания. Видно, что отдельные элементы стружки разделены капиллярами, пронизывающими стружку по всей толщине. Со стороны резца рядом с каждым элементом стружки имеются вакуумные полости, ширина которых составляет примерно 1/3÷1/4 ширины основания стружки.

При образовании сливной стружки отдельные ее элементы на микрофотографии слабо различимы, но пронизывающие ее капилляры видны достаточно четко (рис. 3).

Вакуумные полости образуются также в результате частичного разрушения нароста вследствие срыва (рис. 4) или разрушения части вершины нароста (рис. 5). На фотографиях четко видны капилляры и полости, которые образуются в процессе резания и заполняются СОТС. В процессе обработки металла резанием происходит до 5000 срывов стружки в минуту.

Кроме того, при обработке металла резанием возникают колебания. Причем колебания заготовки

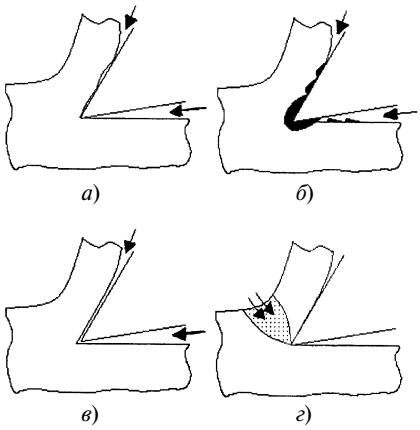


Рис. 1. Возможные варианты поступления СОТС в контактную зону при резании металлов

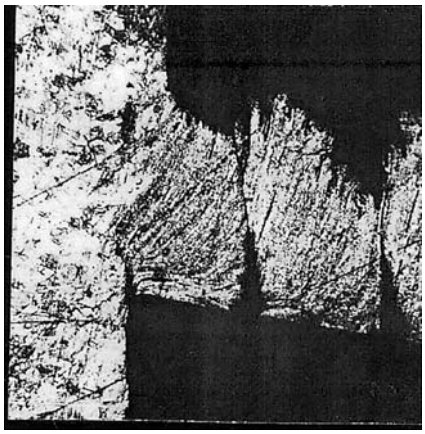


Рис. 2. Микрофотография корня стружки скалывания

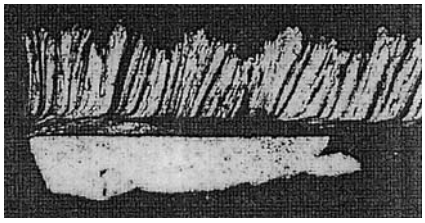


Рис. 3. Микрофотография сливной стружки

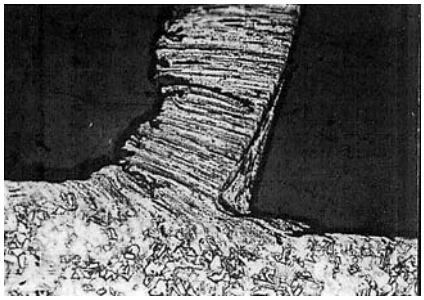


Рис. 4. Корень стружки с наростом

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ, номер проекта 05-08-18065-а.

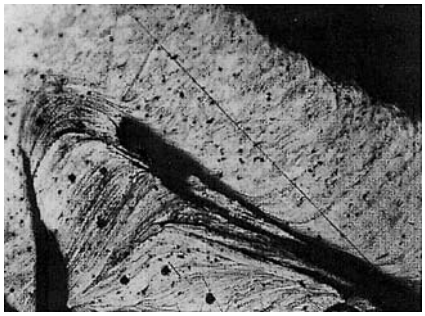


Рис. 5. Нарост с разрушенной вершиной

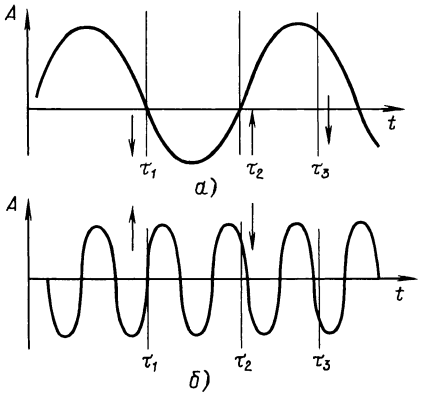


Рис. 6. Колебания заготовки (*а*) и режущего инструмента (*б*) при обработке металла резанием

(рис. 6, *а*) не совпадают с колебаниями инструмента (рис. 6, *б*). В результате этого контактные поверхности обрабатываемого материала и инструмента то сходятся, то расходятся, вследствие чего СОТС проникает на контактные поверхности.

Установлено, что технологические жидкости, несмотря на высокое давление, имеющее место при обработке металла резанием, проникают на контактные поверхности, так как температура в зоне резания превышает 100 °С, и СОТС попадает на контактные поверхности в виде паров, т. е. проникают отдельные молекулы, их радикалы или ионы.

Процесс проникновения СОТС зависит как от ее физико-химических свойств, так и от способа ее подвода в зону резания. Например, эффективность СОТС усиливается при ее подаче под давлением, что подтверждено испытаниями. Так, сверление металлов в камере под давлением показало, что принудительная подача СОТС существенно повышает стойкость режущих инструментов.

Такое явление, как возбуждение электромагнитных полей, возникающее в процессе резания металлов, также может быть использовано для усиления проникающей способности СОТС [2]. Мельчайшие частицы СОТС покрываются оболочкой, в состав которой входит ферромагнитный компонент. Такая композиция получила название магнитной микрокапсулы. Наличие в микрокапсуле магниточувствительного вещества приводит к тому, что под действием электромагнитного поля, имеющего максимальное значение в области вершины режущего инструмента, микрокапсула с заключенной в ней СОТС движется к зоне контакта инструмента и обрабатываемого материала. При этом кинетическая энергия микрокапсулы растет по мере приближения к контактной зоне.

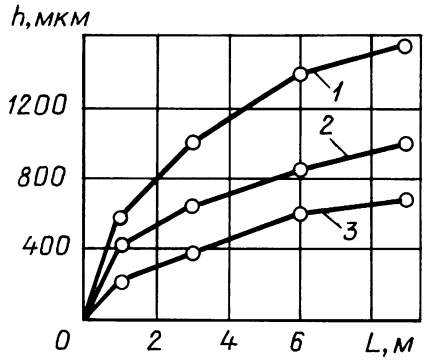


Рис. 8. Зависимость изменения суммарного износа *h* зубьев фрез, прошедших ХТО, и без упрочняющей обработки при резании деталей из стали У8 от длины *L* резания:
1 — без упрочняющей обработки; *2* — с ХТО; *3* — с ХТО, обеспечивающей трибоактивные соединения йода в поверхностном слое инструмента

Совокупность таких параметров микрокапсул, как размер, температура (200÷215 °С), давление (1,7÷2,0 МПа), которое выдерживает капсула без разрушения, скорость движения к контактной зоне (до 32 мм/с), определяет их проникающую способность. Изучение передней поверхности резцов с помощью электронной микроскопии после резания с применением магнитных микрокапсул показало наличие СОТС на контактной поверхности вплоть до вершины резцов, что обусловливает эффективность процесса резания, улучшение показателей обработанных поверхностей и повышение износостойкости инструмента (рис. 7).

Рассмотренные выше механизмы проникновения СОТС на контактные поверхности касаются внешнего смазывания, т. е. СОТС, которые подаются в зону резания извне. Однако существует способ внутреннего смазывания, который заключается в предварительном формировании на глубине до 30÷40 мкм в приповерхностных слоях инструментальных материалов твердосмазочных структур. При истирании рабочих поверхностей инструмента в процессе резания смазочный материал, находящийся в поверхностном слое инструмента, поступает в контатную зону, улучшая трибологические характеристики процесса. Этот способ наиболее эффективен на операциях, когда доступ внешних СОТС в контактную зону ограничен или затруд-

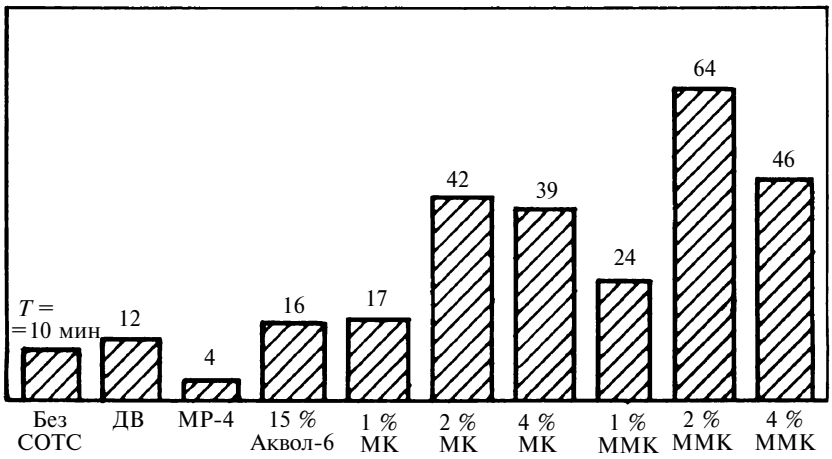


Рис. 7. Гистограмма стойкости (*T*, мин) резцов из стали Р6М5 при точении детали из сплава ВТ6 без СОТС и с различными СОТС:
ДВ — дистиллированная вода, МР-4 — СОЖ, МК — микрокапсула, ММК — магнитная микрокапсула

УДК 621.7:539.3/4

А. Л. ВОРОНЦОВ, д-р техн. наук (МГАПИ)

Новая теория осадки цилиндрической заготовки

Разработана уточненная теория осадки цилиндрической заготовки. Определены напряженное, кинематическое и деформированное состояния осаживаемого материала. Получены формулы для расчета силовых параметров процесса и прогнозирования возможности разрушения. Высокая точность полученных формул подтверждена сопоставлением с многочисленными экспериментальными данными.

Improved theory of the cylindrical blanks upsetting is worked out. Stress, kinematic and strain states of the precipitable material are determined. Formulae are derived to calculated force parameters of the process and to predict breaking possibility. High accuracy of the obtained formulae is backed by multiple experimental data.

Теоретическому исследованию осадки цилиндрической заготовки посвящены известные работы Э. Зибеля и Е. П. Унксова. Однако выполненные ими решения не позволяют осуществлять прогнозирование разрушения и, кроме того, имеют целый ряд существенных недостатков, подробно рассматриваемых далее. Поэтому разработка новой теории осадки, соответствующей современному уровню прикладной теории пластичности, является актуальной.

Известно, что наличие сил трения между торцами осаживаемой заготовки и инструментом приводит к переменности площади поперечного сечения по высоте (рис. 1, справа), называемой для цилиндрических заготовок бочкообразностью. Бочкообразность обусловливает переменность деформированного состояния, однако для определения среднего диаметра, необходимого для расчета напряженного состояния и силы деформирования с достаточной для практики точностью, площадь поперечного сечения можно считать постоянной и использовать расчетную схему, показанную на рис. 2. В этой схеме применена цилиндрическая система координат ρ, θ, z с началом координат на неподвижном нижнем инструменте (см. рис. 2, справа). Осаживающий инструмент движется со скоростью v_0.

Принимаем следующие допущения: 1) материал считаем жесткопластическим, а упрочнение учитываем средней по очагу пластической деформации величиной напряжения текучести σ_s; 2) силы контактного трения определяем по закону Зибеля как $\tau_к = \mu\beta\sigma_s$, где μ — коэффициент трения по напряжению текучести, а β — коэффициент Лоде.

В решении используем относительные величины напряжений, отнесенные к σ_s.

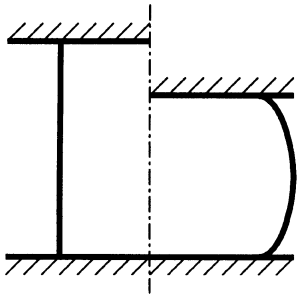


Рис. 1. Осадка заготовки

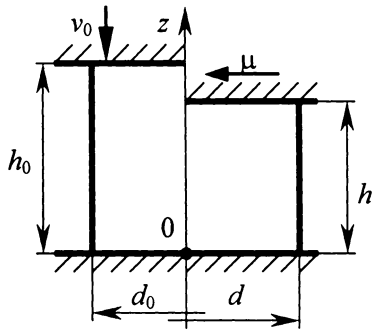


Рис. 2. Расчетная схема осадки

Кинематически возможную осевую скорость запишем в общем виде

$$v_z = f(z), \qquad (1)$$

удовлетворяющем имеющимся граничным условиям: $v_z = -v_0$ при $z = h$ и $v_z = 0$ при $z = 0$.

Из условия несжимаемости

$$\xi_z + \xi_\rho + \xi_\theta = 0, \qquad (2)$$

которое для осесимметричной задачи имеет вид

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{v_\rho}{\rho} = 0 \qquad (3)$$

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

нен (сверление, нарезание резьбы, глубокое фрезерование и т. д.).

На рис. 8 представлены зависимости изменения суммарного износа зубьев дисковых прорезных фрез из стали Р9, прошедших химико-термическую обработку (ХТО) и содержащих в поверхностном слое трибоактивные соединения йода, а также фрез, подвергнутых обычной ХТО и не прошедших упрочняющей обработки.

В некоторых случаях применение СОТС является единственным способом, обеспечивающим возможность обработки резанием. Повышение же эффективности применения СОТС при механической обработке металлов осуществляется путем создания эффективных СОТС и разработкой новых способов их подачи в зону резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Латышев В. Н.** Повышение эффективности СОЖ. М.: Машиностроение, 1985. 65 с.

2. **Наумов А. Г.** Улучшение экологии процессов лезвийной обработки металлов // Междунар. научн.-техн. сб. "Резание и инструмент в технологических системах". Вып. 57. Харьков: ХГПУ, 2000. С. 167—171.

или

$$\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial\rho}(v_\rho\rho)\right] = -\frac{\partial v_z}{\partial z}, \qquad (4)$$

можно найти радиальную скорость

$$v_\rho = \frac{\partial f(z)}{\partial z}\frac{\rho}{2} + \frac{f_1(z)}{\rho}. \qquad (5)$$

Из граничного условия $v_\rho = 0$ при $\rho = 0$ вытекает, что $f_1(z) = 0$ и, следовательно,

$$v_\rho = \frac{\partial f(z)}{\partial z}\frac{\rho}{2}. \qquad (6)$$

Из выражения (6) видно, что полученная функция радиальной скорости в общем случае зависит от координаты z, т. е. позволяет учесть бочкообразность осаживаемой заготовки, что будет нами использовано при определении деформированного состояния. Таким образом, боковая поверхность заготовки на рис. 2 показана цилиндрической условно.

Учитывая формулы (1) и (6), находим скорости деформаций:

$$\left.\begin{aligned}
\xi_\rho &= \frac{\partial v_\rho}{\partial\rho} = \frac{1}{2}\frac{\partial f(z)}{\partial z};\\
\xi_\theta &= \frac{v_\rho}{\rho} = \frac{1}{2}\frac{\partial f(z)}{\partial z};\\
\xi_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial f(z)}{\partial z};\\
\eta_{\rho z} &= \frac{\partial v_\rho}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial\rho} = \frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}\frac{\rho}{2}.
\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Поскольку $\xi_\rho = \xi_\theta$, то коэффициент Лоде $\beta = 1$ и интенсивность скоростей деформаций в упрощенной форме будет:

$$\xi_i = \beta|\xi_{\max}| = \beta|\xi_z| = \frac{\partial f(z)}{\partial z}. \qquad (8)$$

Уравнения связи Леви—Мизеса имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_\rho &= \sigma + \frac{2}{3}\frac{\xi_\rho}{\xi_i};\\
\sigma_\theta &= \sigma + \frac{2}{3}\frac{\xi_\theta}{\xi_i};\\
\sigma_z &= \sigma + \frac{\xi_z}{\xi_i};\\
\tau_{\rho z} &= \frac{1}{3}\frac{\eta_{\rho z}}{\xi_i},
\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

где

$$\sigma = (\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z)/3 \text{ —} \qquad (10)$$

среднее главное напряжение (гидростатическое давление).

Уравнения равновесия для данной задачи имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial\sigma_\rho}{\partial\rho} + \frac{\partial\tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0;\\
&\frac{\partial\sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{z\rho}}{\partial\rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} = 0.
\end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

С учетом выражений (7) и (8) из четвертой формулы системы (9) получаем:

$$\tau_{\rho z} = \frac{1}{6}\frac{\partial^2 f(z)/\partial z^2}{\partial f(z)/\partial z}\rho = f_2(z)\rho. \qquad (12)$$

Подставив выражение (12) во второе уравнение системы (11), найдем:

$$\sigma_z = -2\int f_2(z)dz + f(\rho). \qquad (13)$$

Из системы (9) с учетом зависимостей (7) и (8) следует:

$$\partial\sigma_\rho/\partial\rho = \partial\sigma_z/\partial\rho = \partial f(\rho)/\partial\rho. \qquad (14)$$

Поскольку $\xi_\rho = \xi_\theta$, то из системы (9) следует, что и $\sigma_\rho = \sigma_\theta$. С учетом этого, подставив выражения (12) и (14) в первое уравнение системы (11), получим:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial f(\rho)}{\partial\rho} = -\frac{\partial f_2(z)}{\partial z}. \qquad (15)$$

Так как левая часть этого уравнения зависит только от ρ, а правая — только от z, то обе эти части должны равняться постоянной величине C, поэтому:

$$f(\rho) = \frac{C\rho^2}{2} + C_1; \qquad (16)$$

$$f_2(z) = -Cz + C_2. \qquad (17)$$

Подставив выражение (17) в формулу (12), найдем касательное напряжение

$$\tau_{\rho z} = (-Cz + C_2)\rho. \qquad (18)$$

Произвольные постоянные C и C_2 определяются из следующих граничных условий: $\tau_{\rho z} = -\mu$ при $z = h$ и $\rho = d/2$; $\tau_{\rho z} = \mu$ при $z = 0$ и $\rho = d/2$. Отсюда:

$$\left.\begin{aligned}
C &= 4\mu/dh;\\
C_2 &= 2\mu/d.
\end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

Подставив формулы (16), (17) и (19) в выражение (13), получим:

$$\sigma_z = \frac{4\mu}{dh}(z^2 - hz + 0{,}5\rho^2) + C_1. \qquad (20)$$

Вычтя из первого выражения системы (9) третье и подставив соотношения (7), (8) и (20), найдем:

$$\sigma_\rho = \sigma_z + 1 = 1 + \frac{4\mu}{dh}(z^2 - hz + 0{,}5\rho^2) + C_1. \qquad (21)$$

Так как радиальное напряжение σ_ρ зависит от z, то удовлетворить условию $\sigma_\rho = 0$ по всей высоте боковой поверхности заготовки невозможно. Поэтому используем частное граничное условие $\sigma_\rho = 0$ при $z = h$ и $\rho = d/2$, откуда найдем произвольную постоянную

$$C_1 = -1 - \mu d/2h. \qquad (22)$$

Выбор такого граничного условия обусловлен тем, что это повышает расчетное значение удельной силы, т. е. соответствует используемому нами принципу верхней оценки. Кроме того, при этом одновременно удовлетворяется граничное условие $\sigma_\rho = 0$ при $z = 0$ и $\rho = d/2$, а также получается наиболее простая формула для определения удельной силы деформирования. Легко проверить, что при использовании, например, граничного условия $\sigma_\rho = 0$ при $z = h/2$ и $\rho = d/2$ расчетные значения удельной силы уменьшатся, а окончательная формула станет более громоздкой.

Подставив выражение (22) в соотношение (20) при $z = h$, получим формулу нормальных напряжений на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_z = -1 - \frac{\mu}{dh}(0{,}5d^2 - 2\rho^2). \qquad (23)$$

С учетом этого относительная удельная сила осадки

$$q = \frac{2\pi}{\pi d^2/4}\int_0^{d/2}|\sigma_z|\rho d\rho = 1 + \frac{\mu d}{4h}. \qquad (24)$$

Из условия постоянства объема

$$d = d_0\sqrt{h_0/h}. \qquad (25)$$

Натуральное значение силы осадки определено выражением

$$P = \sigma_s F q, \qquad (26)$$

где

$$F = \pi d^2/4. \qquad (27)$$

Теперь проанализируем деформированное состояние заготовки. Укажем, что такой анализ в строгом понимании накопленной деформации ранее не проводился.

По определению А. А. Ильюшина накопленной деформацией называется величина, полная производная которой по времени равна интенсивности скоростей деформации, т. е.

$$de_i/dt = \xi_i. \qquad (28)$$

В общем случае накопленная деформация e_i представляет собой сложную функцию координат и времени, т. е. $e_i = f(x, y, z, t)$. С учетом этого по известному правилу дифференцирования сложных функций выражение (28) следует переписать в виде:

$$\xi_i = \frac{de_i}{dt} = \frac{\partial e_i}{\partial t} + \frac{\partial e_i}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial e_i}{\partial y}\frac{dy}{dt} + \frac{\partial e_i}{\partial z}\frac{dz}{dt} = \frac{\partial e_i}{\partial t} + v_x\frac{\partial e_i}{\partial x} + v_y\frac{\partial e_i}{\partial y} + v_z\frac{\partial e_i}{\partial z}.$$

Применительно к осадке, являющейся нестационарным процессом, можно принять, что $e_i = f(t)$. Тогда предыдущее выражение примет вид:

$$\xi_i = \partial e_i/\partial t. \qquad (29)$$

Уравнение (29) с учетом выражения (8) и третьей формулы системы (7) позволяет найти накопленную деформацию:

$$e_i = \int|\xi_z|\,\partial t + C_3 = \int\left|\frac{\partial v_z}{\partial z}\right|\partial t + C_3 = -\int\frac{\partial v_z}{\partial z/\partial t} + C_3 = -\int\frac{\partial v_z}{v_z} + C_3 = -\ln|v_z| + C_3. \qquad (30)$$

Произвольная постоянная C_3 определяется из начального условия

$$e_i = 0 \text{ при } z = z_0, \qquad (31)$$

где z_0 — начальная координата рассматриваемой материальной точки.

Связь между текущей и начальной координатами находится с помощью уравнения

$$dz = v_z dt, \qquad (32)$$

которое решается с учетом того, что

$$h = h_0 - v_0 t. \qquad (33)$$

Возникающая при решении произвольная постоянная C_4 находится из начального условия

$$z = z_0 \text{ при } t = 0. \qquad (34)$$

Процесс осадки можно представить в виде сближения верхней и нижней поверхностей инструмента с одинаковой скоростью $v_0/2$ (рис. 3). Для получения конкретных расчетных выражений в силу симметрии будем рассматривать только нижнюю половину осаживаемой заготовки (рис. 4). Для использования наиболее простых функций скоростей течения будем считать нижнюю поверхность инструмента ($z = 0$) неподвижной; в этом случае с учетом рис. 3 очевидно, что срединная плоскость приближается к нижней поверхности со скоростью $v_0/2$.

В соответствии с выражениями (1) и (6) кинематически возможные скорости течения можно задать формулами:

$$\left.\begin{aligned} v_z &= -v_0\left(\frac{az}{h} + \frac{2bz^2}{h^2}\right); \\ v_\rho &= v_0\left(\frac{a}{h} + \frac{4bz}{h^2}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (35)$$

в которых коэффициенты a и b связаны соотношением

$$a + b = 1. \qquad (36)$$

В этом случае автоматически удовлетворяются имеющиеся граничные условия: $v_z = 0$ при $z = 0$; $v_z = -v_0/2$ при $z = h/2$. Используя выражения (35) и (36), рассмотрим возможные варианты деформации при осадке заготовок умеренной высоты ($h_0/d_0 \leqslant 2$), для которых характерно одинарное бочкообразование.

1. *Свободное течение* ($\mu = 0$): заготовка сохраняет цилиндрическую форму, т. е. v_ρ не зависит от ρ, и, следовательно, $a = 1$, $b = 0$:

$$\left.\begin{aligned} v_z &= -v_0 z/h; \\ v_\rho &= v_0\rho/2h. \end{aligned}\right\} \qquad (37)$$

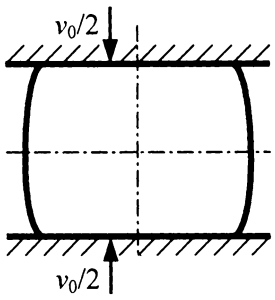


Рис. 3. Симметрия осадки

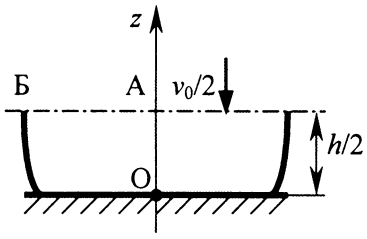


Рис. 4. Схема для определения накопленной деформации

В этом случае из выражения (30) получаем:

$$e_i = -\ln(v_0 z/h) + C_3. \qquad (38)$$

Из условия (31)

$$C_3 = \ln\left(v_0\frac{z_0}{h}\right). \qquad (39)$$

Подставив выражение (39) в формулу (38), получим:

$$e_i = \ln(z_0/z). \qquad (40)$$

Подставив первое выражение системы (35) в выражение (32), с учетом формулы (33) приходим к уравнению

$$dz/z = \frac{-v_0 dt}{h_0 - v_0 t}, \qquad (41)$$

решая которое, находим:

$$z = C_4(h_0 - v_0 t). \qquad (42)$$

Используя условие (34), окончательно получаем связь между текущей и начальной координатами материальной частицы:

$$z = z_0\frac{h_0 - v_0 t}{h_0} = z_0\frac{h}{h_0}. \qquad (43)$$

Подставив соотношение (43) в выражение (40), получим окончательную формулу для определения

накопленных деформаций при осадке со свободным течением:

$$e_i = \ln(h_0/h). \qquad (44)$$

Очевидно, что в этом случае накопленные деформации в характерных точках А и О (см. рис. 4) равны между собой и определяются выражением (44).

2. *Прилипание* ($\mu = 0{,}5$): заготовка получает в процессе деформации наибольшую бочкообразность, а вблизи поверхности контакта заготовки и инструмента образуется застойная зона, т. е. на этой поверхности $v_\rho = 0$ и, следовательно, $a = 0$, $b = 1$:

$$\left.\begin{aligned} v_z &= -2v_0 z^2/h^2, \\ v_\rho &= 2v_0 z\rho/h^2. \end{aligned}\right\} \qquad (45)$$

В этом случае из выражения (30) получаем:

$$e_i = -\ln(2v_0 z^2/h^2) + C_3. \qquad (46)$$

Из условия (31)

$$C_3 = \ln(2v_0 z_0^2/h^2). \qquad (47)$$

Подставив выражение (47) в формулу (46), получим:

$$e_i = 2\ln(z_0/z). \qquad (48)$$

Подставив первое выражение системы (45) в выражение (32), с учетом формулы (33) приходим к уравнению

$$dz/z^2 = -2v_0 dt/(h_0 - v_0 t)^2, \qquad (49)$$

решая которое, получаем:

$$z = 1/\left(\frac{2}{h_0 - v_0 t} + C_4\right). \qquad (50)$$

Используя условие (34), окончательно получаем связь между текущей и начальной координатами материальной частицы:

$$z = \frac{z_0 h_0 h}{2(h_0 - h)z_0 + h_0 h}. \qquad (51)$$

Подставив соотношение (51) в выражение (48), получим окончательную формулу для определения накопленных деформаций при осадке с прилипанием:

$$e_i = 2\ln\left(2z_0\frac{h_0 - h}{h_0 h} + 1\right). \qquad (52)$$

В этом случае накопленная деформация в точке А (см. рис. 4), начальная координата которой $z_0 = h_0/2$, будет:

$$e_{i\mathrm{A}} = 2\ln(h_0/h). \qquad (53)$$

Накопленная деформация в точке О, начальная координата которой $z_0 = 0$,

$$e_{i\mathrm{O}} = 0. \qquad (54)$$

3. *Затрудненное течение* ($\mu = 0{,}25$): заготовка получает в процессе деформации среднюю бочкообразность, так как радиальная скорость v_ρ на поверхностях контакта с инструментом имеет меньшую величину, чем в срединной плоскости. Этот случай является промежуточным между вариантами *1* и *2*, а следовательно, можно принять $a = 0{,}5$, $b = 0{,}5$. Дальнейшее определение деформированного состояния в этом случае осуществляется аналогично его определению для вариантов *1* и *2*. Но так как функция v_z достаточно сложна [см. первое выражение системы (35)], то в этом случае для определения зависимости между текущей и начальной координатами $z = f(z_0)$ приходится решать дифференциальное уравнение Бернулли, что довольно трудоемко. Общие выражения для текущей координаты и накопленной деформации получаются аналогичными выведенным нами для случая затрудненного течения при выдавливании стаканов (см. формулы (4.131), (4.132) в книге [1]). Поэтому приведем только окончательные результаты:

$$e_{i\mathrm{A}} = 1{,}5\ln(h_0/h), \qquad (55)$$

$$e_{i\mathrm{O}} = 0{,}5\ln(h_0/h). \qquad (56)$$

Соответствующие рассмотренным случаям эпюры распределения накопленных деформаций по высоте осаживаемой заготовки показаны на рис. 5. С достаточной для практики точностью можно считать, что средняя величина накопленной деформации в объеме заготовки определяется выражением

$$e_i = \frac{e_{i\mathrm{A}} + e_{i\mathrm{O}}}{2} = \ln\frac{h_0}{h}, \qquad (57)$$

т. е. будет одинакова во всех трех случаях.

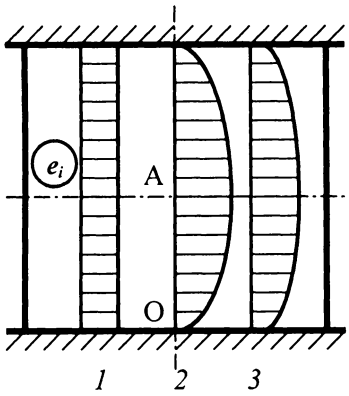


Рис. 5. Варианты распределения накопленных деформаций по высоте осаживаемой заготовки

Если кривая упрочнения построена не для логарифмических, а для относительных деформаций, то последние можно определить по формуле

$$e = 1 - e^{-e_i}. \qquad (58)$$

Из формул (53) и (55) видно, что вследствие неравномерности деформации местная накопленная деформация может в 1,5÷2 раза превысить среднюю величину накопленной деформации, определяемую по формуле (57). Этот теоретический результат полностью совпадает с экспериментальными данными, приведенными на с. 253 работы [2].

Из рис. 5 видно, что неравномерность деформации сильно зависит от условий трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки. С уменьшением коэффициента трения неравномерность распределения накопленных деформаций также уменьшается. Сопоставительный анализ формул (44), (53) и (55) с учетом соответствующих коэффициентов трения μ показывает, что их можно обобщить, представив в следующем виде:

$$e_{i\mathrm{A}} = (1 + 2\mu)\ln\frac{h_0}{h} = (1 + 2\mu)e_i. \qquad (59)$$

Следует также указать, что в процессе осадки может происходить качественное изменение характера деформированного состояния. Например, в начале осадки заготовки умеренной высоты на сухих шероховатых плитах почти вся контактная поверхность представляет собой зо-

ну прилипания [3]. Однако по мере уменьшения высоты на значительной части контактной поверхности начинает развиваться скольжение, которое постепенно охватывает большую часть контактной поверхности. Когда заготовка становится достаточно низкой, ее бочкообразность практически исчезает [4]. Таким образом, вначале деформированное состояние соответствует рассмотренному выше случаю прилипания, в середине — случаю затрудненного течения, а в конце — случаю свободного течения. В принципе при таком протекании процесса для расчета накопленных деформаций следует сначала использовать формулы (53), (54), а при значении $h = h_1$ переходить на расчет по формулам (55), (56), принимая $h_0 = h_1$ и складывая получающиеся значения со значениями, найденными по формулам (53), (54) при $h = h_1$, а затем, при значении $h = h_2$, переходить на аналогичный расчет по формуле (44). Это вызывает существенные трудности, связанные с тем, что точное значение переходных высот h_1 и h_2 неизвестно.

Поэтому для проверки формул (55), (56) с учетом формулы (58) нами использованы экспериментальные (индекс "э") данные о распределении накопленных деформаций при осадке с небольшим ходом низкой заготовки с $h_0/d_0 = 0{,}5$, для которой с самого начала процесса деформирования наблюдалось затрудненное течение (см. рис. 70, *б* на с. 167 работы [2]): при $h/h_0 = 0{,}84$, $e_{i\text{O}} = 0{,}087$, $e_{\text{O}} = 0{,}08$, $e_{\text{Oэ}} = 0{,}09$, $\delta = 7{,}8$ %; $e_{i\text{A}} = 0{,}262$, $e_{\text{A}} = 0{,}23$, $e_{\text{Aэ}} = 0{,}22$, $\delta = 4{,}3$ % (здесь и далее δ — расхождение, вычисляемое по отношению к теоретической величине).

Так как для практических расчетов, связанных с прогнозированием разрушения, важна только накопленная деформация $e_{i\text{A}}$, то тщательная проверка была проведена лишь для этой деформации, которую независимо от изменения деформированного состояния по ходу осадки вычисляли по формуле (53), дающей наибольшую величину, т. е. оценку с запасом. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных (в виде расхождения δ) представлены в табл. 1. Следует отметить, что для экспериментальных данных, соответствующих первой строке табл. 1 (осадка с прилипанием), авторы работы [3] привели сопоставление с теоретическим распределением деформаций, полученным ими с помощью трех громоздких уравнений, основанных на теории малых деформаций (окончательная формула, подобная нашей формуле (52), в работе [3] не получена). Сравнение показывает значительную погрешность результатов теоретического расчета по работе [3]: $e_{\text{O}} = 0{,}22$, $e_{\text{Oэ}} = 0$, $\delta = 100$ % [по нашей формуле (54) $e_{\text{O}} = 0$, т. е. $\delta = 0$]; $e_{\text{A}} = 0{,}60$, $e_{\text{Aэ}} = 0{,}73$, $\delta = 22$ % [по нашим формулам (53), (58) $e_{\text{A}} = 0{,}75$, т. е. $\delta = 2{,}7$ %].

Таблица 1

Сравнение расчетных e_{A} и экспериментальных $e_{\text{Aэ}}$ значений максимальной накопленной деформации при осадке

h_0/d_0	h/h_0	$e_{i\text{A}}$	e_{A}	$e_{\text{Aэ}}$	δ, %	Эксперимент
2,0	0,50	1,386	0,75	0,73	2,7	[3], с. 200, рис. 74
1,0	0,70	0,713	0,51	0,52	2,0	[3], с. 190, рис. 66, *а*
1,7	0,65	0,862	0,58	0,60	3,9	[2], с. 167, рис. 70, *а*
	0,56	1,160	0,69	0,72	4,9	
	0,48	1,468	0,77	0,80	4,0	
	0,39	1,883	0,85	0,87	2,6	
	0,28	2,546	0,92	0,90	2,3	
	0,20	3,219	0,96	0,93	3,1	
0,5	0,69	0,742	0,52	0,50	4,6	[2], с. 167, рис. 70, *б*
	0,63	0,924	0,60	0,60	0,0	
	0,56	1,160	0,69	0,70	2,0	
	0,44	1,642	0,81	0,79	2,0	
	0,38	1,935	0,86	0,83	3,0	

Если напряжение текучести осаживаемого материала зависит от скорости деформации, то ее можно определить по формуле

$$\xi_i = v_0/h, \qquad (60)$$

которая получена подстановкой первого выражения системы (37) в формулу (8).

При осадке высоких заготовок ($h_0/d_0 \geqslant 2{,}5$) наблюдается двойное бочкообразование (рис. 6). При этом в зонах **1** и **3** имеет место неравномерное распределение накопленных деформаций. Промежуточная зона **2** при осадке остается цилиндрической и, соответственно, характеризуется равномерным распределением накопленных деформаций. По мере осадки зона **2** уменьшается и в определенный момент зоны **1** и **3** соприкасаются друг с другом (см. рис. 6, справа). При дальнейшей осадке двойная бочка вследствие более интенсивного увеличения срединного диаметра переходит в одинарную, и процесс продолжается так же, как в случае осадки заготовки умеренной высоты (см. рис. 1).

Такое формоизменение при осадке высоких заготовок известно давно, однако его теоретическое объяснение в литературе отсутствует. Только авторы работы [3] на с. 188 объясняют двойное бочкообразование тем, что в соответствии с принципом Сен-Венана действие сил внешнего трения затухает по мере удаления от контактных поверхностей. Данное объяснение является неубедительным, так как фактически принцип Сен-Венана объясняет не двойное, а одинарное бочкообразование: по мере удаления от контактных поверхностей затухает влияние сил внешнего трения, сдерживающее течение металла в радиальном направлении, в результате чего сре-

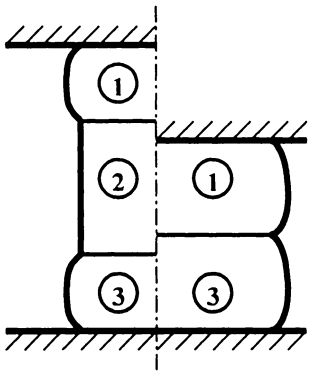


Рис. 6. Двойное бочкообразование при осадке высокой заготовки

динные слои расширяются быстрее приконтактных, образуя бочкообразность боковой поверхности заготовки. Возможность образования двойной бочки и ее последующее превращение в одинарную этим никак не объясняется.

Для объяснения упомянутых явлений обратимся к рис. 6. Так как металл в зонах **1** и **3** течет в радиальном направлении быстрее, чем в зоне **2**, сдерживающей это течение, то на границах между этими зонами возникают значительные касательные напряжения (при рассмотрении жесткопластической модели эти напряжения равны предельным). Поскольку зона **2** сохраняет цилиндричность, то кинематическое состояние в ней описывается выражениями (37), при которых $\eta_{\rho z}$ (7) и, соответственно, $\tau_{\rho z}$ (9) равны нулю. Таким образом, зона **2** представляет собой область, в которой касательные напряжения равны нулю. Следовательно, в соответствии с известным принципом минимума энергии деформации двойное бочкообразование при осадке высоких заготовок обусловлено тем, что при этом работа касательных напряжений на соответствующих сдвиговых деформациях затрачивается лишь в зонах **1** и **3**, в то время как в зоне **2** она равна нулю, что в сумме дает меньшую энергию деформации, несмотря на увеличение расхода энергии в зонах **1** и **3** из-за повышения касательных напряжений на границах с зоной **2**. Этим объясняется также и тот факт, что с увеличением высоты заготовки зона **2** также увеличивается по сравнению с зонами **1** и **3**, поскольку это позволяет сосредоточить повышенный расход энергии в сравнительно малых зонах. Поскольку затухание действия сил контактного трения имеет определенную протяженность, то, соответственно, и высота зон **1** и **3** не может стать бесконечно малой. Поэтому в процессе осадки будет уменьшаться высота именно зоны **2**. В момент, когда зоны **1** и **3** соприкоснутся друг с другом (см. рис. 6, справа), в силу симметрии течения на границе между ними касательные напряжения станут равными нулю. Это обусловливает облегчение радиального течения металла вблизи данной границы по сравнению с расположенными выше и ниже слоями, радиальное течение в которых сдерживается влиянием контактного трения. Поэтому при дальнейшей осадке будет происходить опережающее течение срединных слоев, приводящее сначала к выравниванию образующей боковой поверхности, а затем и к появлению одинарной бочкообразности.

Рассмотренную физическую модель можно описать и математически, однако это выходит за рамки данной статьи, поскольку высокие заготовки при осадке в процессах объемной штамповки, как правило, не используют. Это обусловлено не только возможной потерей устойчивости, но и тем, что в силу непараллельности верхнего и нижнего торцов заготовки и недостаточно жесткого направления верхней и нижней осадочных плит обычно при осадке высоких заготовок возникает значительный перекос их оси, приводящий к искривлению боковой поверхности и смещению верхнего и нижнего торцов заготовки относительно друг друга.

Для проверки полученных расчетных формул для определения силы осадки были использованы результаты экспериментов А. М. Дмитриева [8] по холодной осадке обезжиренных цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава АД0. Кривая упрочнения данного сплава была получена испытанием на сжатие образцов с выточками по торцам, заполненными смазочным материалом. Аппроксимация кривой имеет вид: $\sigma_s = 140 + 90e^{-e_i} - 155e^{-2e_i}$ МПа.

Для расчетов использовали формулы (24)—(27) и (57), (58). Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 2. Для большей объективности было также проведено сопоставление с результатами экспериментов, которые, включая значения коэффициентов трения, были взяты со с. 165—168 работы [5]. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 3—5. Напряжения текучести σ_s в табл. 3 определяли по кривой упрочнения, взятой из справочника [6] и показанной на рис. 7. Напряжения текучести в табл. 4 взяты из табл. 7, с. 167 книги [5]. Напряжения теку-

Таблица 2

Сравнение расчетных P и экспериментальных $P_э$ значений силы холодной осадки цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава АД0 (μ = 0,3)

d_0	h_0	h	d	F, мм^2	e_i	e	σ_s, МПа	q	P	$P_э$	δ, %
мм									кН		
20	20	16,90	21,76	371,8	0,168	0,155	105	1,097	428	400	6,6
20	20	13,95	23,95	450,4	0,360	0,303	130	1,129	661	630	4,7
20	20	11,50	26,38	546,4	0,553	0,425	140	1,172	897	900	0,3

Таблица 3

Сравнение расчетных P и экспериментальных $P_э$ значений силы холодной осадки цилиндрической заготовки из стали 10 (μ = 0,3)

d_0	h_0	h	d	F, мм^2	e_i	e	σ_s, МПа	q	P	$P_э$	δ, %
мм									кН		
10,04	10,05	3,70	16,55	215,0	0,999	0,632	650	1,335	187	190	1,6
9,97	6,83	3,23	14,49	165,0	0,749	0,527	610	1,337	134	127	5,2
9,96	7,80	3,39	15,11	179,4	0,833	0,565	620	1,334	148	142	4,1

Таблица 4

Сравнение расчетных P и экспериментальных $P_э$ значений силы холодной осадки цилиндрической заготовки из латуни Л62 (μ = 0,15)

d_0	h_0	h	d	F, мм^2	e_i	σ_s, МПа	q	P	$P_э$	δ, %
мм								кН		
10,03	17,07	5,57	17,56	242,1	1,120	711	1,118	193	198	2,6
10,06	17,03	5,69	17,40	237,7	1,096	710	1,115	188	198	5,3
10,00	20,10	6,43	17,68	245,4	1,140	712	1,103	193	198	2,6
9,94	19,05	5,43	18,62	272,4	1,256	717	1,129	221	238	7,7
9,95	18,97	5,33	18,77	276,7	1,270	718	1,132	225	237	5,3
9,90	20,01	6,30	17,64	244,3	1,156	713	1,105	193	197	2,1

Таблица 5

Сравнение расчетных P и экспериментальных $P_э$ значений силы холодной осадки цилиндрической заготовки из стали 35Х (μ = 0,15)

d_0	h_0	h	d	F, мм^2	e_i	e	σ_s, МПа	q	P	$P_э$	δ, %
мм									кН		
10,00	11,76	4,52	16,13	204,3	0,956	0,616	1050	1,134	243	236	2,9
9,93	10,79	4,52	15,34	184,8	0,870	0,581	1030	1,127	215	216	0,5
9,95	10,82	4,51	15,42	186,7	0,875	0,583	1030	1,128	217	216	0,5
9,95	9,85	4,43	14,83	172,8	0,799	0,550	1010	1,126	196	196	0,0
9,96	8,78	4,47	13,96	153,0	0,675	0,491	980	1,117	168	169	0,6
9,96	8,91	4,49	14,04	154,7	0,685	0,496	980	1,117	169	170	0,6

чести в табл. 5 определяли по кривой упрочнения, взятой из справочника [6] и показанной на рис. 8.

Из полученных формул деформированного состояния видно, что величины накопленной деформации в процессе осадки непрерывно возрастают. При определенном значении рабочего хода исчерпывается ресурс пластичности осаживаемого материала, что приводит к появлению трещин в изделии. Поэтому для получения высококачественных изделий необходимо определить параметры, требующиеся для расчета предельного формоизменения заготовки при осадке по существующим теориям разрушения. Такими параметрами согласно работе [7] являются величины накопленной деформации e_i, гидростатического давления σ и, в случае ярко выраженной зависимости свойств материала от скорости деформации, интенсивности ξ_i скоростей деформации в опасной точке очага пластической деформации.

При осадке наиболее опасной точкой является точка Б, расположенная посередине боковой поверхности заготовки (см. рис. 4), т. е. в месте наибольшей бочкообразности, поскольку накопленные деформации и алгебраическая величина гидростатического давления здесь достаточно велики. В нашей постановке

$$e_{i\text{Б}} = e_{i\text{А}}. \qquad (61)$$

Из выражения (10) с учетом формулы (21) и того, что $\sigma_\rho = \sigma_\theta$, следует, что гидростатическое давление

$$\sigma = \frac{2}{3} + \sigma_z. \qquad (62)$$

Подставив сюда формулу (20) с учетом выражения (22), получим при $z = h/2$ и $\rho = d/2$:

$$\sigma = -0{,}333 - \mu h/d. \qquad (63)$$

Конкретные примеры прогнозирования разрушения будут представлены в статье, посвященной исследованию процесса высадки.

Теперь проанализируем недостатки считающегося наиболее обоснованным решения задачи по определению силы осадки, выполненного Е. П. Унксовым с помощью инженерного метода (известное решение Э. Зибеля, при котором касательные напряжения приняты постоянными по всей поверхности контакта, является частным случаем решения Е. П. Унксова). В результате этого решения в общем случае [4] получено распределение нормальных и касательных напряжений на контактной поверхности, показанное на рис. 9.

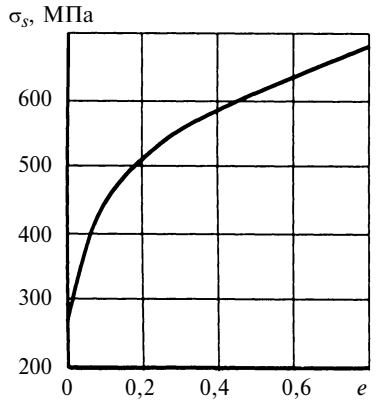


Рис. 7. Кривая упрочнения стали 10

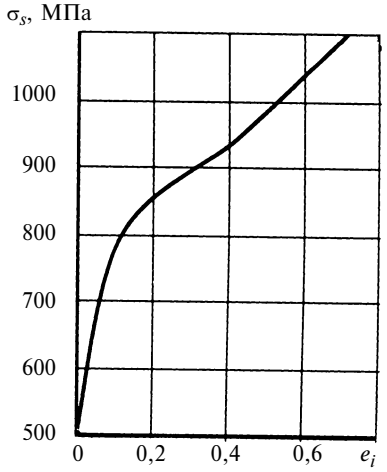


Рис. 8. Кривая упрочнения стали 35Х

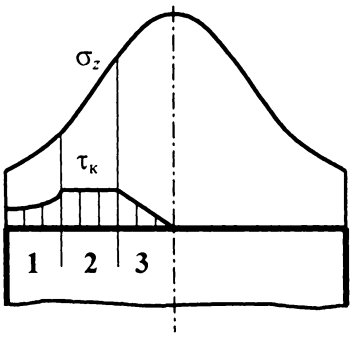


Рис. 9. Эпюры контактных напряжений в решении Е. П. Унксова

1. Равенства $\xi_\rho = \xi_\theta$ и $\sigma_\rho = \sigma_\theta$, необходимые для решения упрощенного уравнения равновесия, приняты бездоказательно. Широко распространенное мнение, что осесимметричная деформация предопределяет эти равенства, является неверным, что будет доказано ниже.

2. Приняты допущения, что на одном участке контактной поверхности (см. рис. 9, участок **1**) касательные напряжения определяются законом Амонтона—Кулона $\tau_к = \mu\sigma_n$, т. е. пропорциональны нормальному напряжению и, соответственно, возрастают в направлении оси симметрии аналогично росту $\sigma_n = |\sigma_z|$, а на другом (участок *2*) касательные напряжения постоянны. Между тем упомянутые в п. 1 равенства возможны лишь при определенном виде скоростей течения, описываемом выражениями (1) и (6). Но при таких скоростях течения в соответствии со строго выведенным выражением (12) касательные напряжения неизбежно зависят от радиуса ρ по закону, близкому к линейному, при использовании точного выражения для интенсивности ξ_i скоростей деформации и по линейному закону при использовании приближенного выражения для ξ_i. Поэтому они будут уменьшаться в направлении оси, что противоречит как одному, так и другому допущению. Таким образом, при условии равенства радиального и тангенциального напряжений оба принятых в отношении касательных напряжений допущения являются невозможными.

3. Наличие участка **2** с постоянными касательными напряжениями объясняется тем, что на этом участке вследствие возрастания σ_z касательные напряжения, определяемые по закону Амонтона—Кулона, начинают превосходить предельно возможную величину $\tau_к = 0{,}5\sigma_s$. Поэтому на данном участке касательные напряжения принимаются постоянными, равными предельной величине. Следуя данной логике, участка **3**, на котором касательные напряжения приняты линейно падающими до нуля, вообще не должно быть, так как напряжения σ_z на этом участке еще более возрастают, т. е. тут с еще большим основанием касательные напряжения следует принять постоянными, равными предельной величине. Однако для устранения очевидных недостатков решения, связанных с получением излома на эпюре нормальных напряжений и разрыва касательных напряжений на оси симметрии, принятая логика решения нарушается искусственным введением участка **3**.

4. Так как участок **3** исходными положениями решения никак не мотивирован, то невозможно доказательно определить радиус его границы с участком **2**. В результате этот радиус задается бездоказательно, со ссылкой на достаточное приближение к экспериментальным данным. Фактически такое исследование является уже не теоретическим, а экспериментально-аналитическим.

5. Естественно, что наименьшие контактные касательные напряжения, действующие на участке **3**, должны максимально облегчать радиальное скольжение металла на данном участке. Однако данный участок вопреки теоретическому смыслу называется "зоной прилипания". Такая подмена понятий позволяет отсутствием деформации кольцевых рисок, нанесенных в данной зоне, экспериментально "доказать" наличие участка **3** и определить его протяженность, хотя на самом деле отсутствие деформации никак не подтверждает падения касательных напряжений до нуля.

Столь большое число противоречащих друг другу предположений приводит к непредсказуемости надежности результатов анализа. В итоге решения инженерным методом задач более сложных, чем осадка, часто оказываются малопригодными для практического использования.

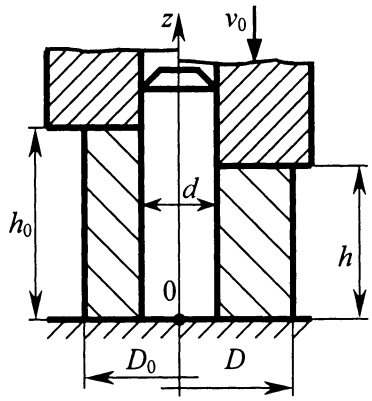


Рис. 10. Осадка полой заготовки на оправке

Это и побудило автора выполнить приведенное выше достаточно строгое теоретическое решение, основанное на минимальном числе допущений и лишенное перечисленных недостатков.

Теперь рассмотрим осадку полой заготовки на оправке, расчетная схема которой представлена на рис. 10. Кинематически возможную осевую скорость возьмем в виде выражения (1). В результате, сделав соответствующие выкладки, получим, что радиальная скорость определяется выражением (5). Из граничного условия $v_\rho = 0$ при $\rho = d/2$ вытекает, что

$$f_1(z) = -\frac{\partial f(z)}{z}\,\frac{d^2}{8} \qquad (64)$$

и, следовательно,

$$v_\rho = \frac{1}{2}\,\frac{\partial f(z)}{\partial z}\left(\rho - \frac{d^2}{4\rho}\right). \qquad (65)$$

Учитывая формулы (1), (7) и (65), находим скорости деформаций:

$$\left.\begin{aligned}
\xi_z &= -\frac{\partial f(z)}{\partial z};\\
\xi_\rho &= \frac{1}{2}\,\frac{\partial f(z)}{\partial z}\left(1 + \frac{d^2}{4\rho^2}\right);\\
\xi_\theta &= \frac{1}{2}\,\frac{\partial f(z)}{\partial z}\left(1 - \frac{d^2}{4\rho^2}\right);\\
\eta_{\rho z} &= \frac{1}{2}\,\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}\left(\rho - \frac{d^2}{4\rho}\right).
\end{aligned}\right\} \qquad (66)$$

Из полученных выражений видно, что в данном случае $\xi_\rho \neq \xi_\theta$, а следовательно, $\sigma_\rho \neq \sigma_\theta$. Это доказывает, что принятие данных равенств лишь на основании осесимметричности деформации является некорректным.

Так как $\rho \geqslant d/2$, то из сравнения первого и второго выражений системы (66) видно, что и при осадке полой заготовки максимальной по абсолютной величине скоростью деформации является ξ_z. С учетом этого из выражения (8) следует, что интенсивность скоростей деформаций

$$\xi_i = \beta \frac{\partial f(z)}{\partial z}. \qquad (67)$$

С учетом формулы (67) и четвертых выражений систем (9) и (66) получаем:

$$\tau_{\rho z} = \frac{1}{6} \frac{\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2}\left(\rho - \frac{d^2}{4\rho}\right)}{\beta \frac{\partial f(z)}{\partial z}} = f_2(z)\left(\rho - \frac{d^2}{4\rho}\right). \qquad (68)$$

Подставив выражение (68) во второе уравнение системы (11), найдем:

$$\sigma_z = -2\int f_2(z)dz + f(\rho). \qquad (69)$$

Из систем (9) и (66) видно, что наибольшим по алгебраической величине нормальным напряжением будет σ_ρ, а наименьшим — σ_z. С учетом этого приближенное условие пластичности имеет вид:

$$\sigma_\rho - \sigma_z = \beta, \qquad (70)$$

откуда

$$\sigma_\rho = \sigma_z + \beta. \qquad (71)$$

Из систем (9) и (66) с учетом выражения (67) следует:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \frac{2}{3\xi_i}(\xi_\rho - \xi_\theta) = \frac{1}{6\beta}\frac{d^2}{\rho^2}. \qquad (72)$$

Подставив выражения (69), (71) и (72) в первое уравнение равновесия системы (11), получим уравнение

$$\frac{4\rho}{4\rho^2 - d^2}\left(\frac{\partial f(\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{6\beta}\frac{d^2}{\rho^3}\right) = -\frac{\partial f_2(z)}{\partial z}. \qquad (73)$$

Так как левая часть этого уравнения зависит только от ρ, а правая — только от z, то обе эти части должны равняться постоянной величине C_5, поэтому:

$$f(\rho) = \frac{1}{12\beta}\frac{d^2}{\rho^2} + \frac{C_5}{2}\rho^2 - \frac{C_5 d^2}{4}\ln\rho + C_6, \qquad (74)$$

$$f_2(z) = -C_5 z + C_7. \qquad (75)$$

Подставив выражение (75) в формулу (68), найдем касательные напряжения:

$$\tau_{\rho z} = (C_7 - C_5 z)(\rho - d^2/4\rho). \qquad (76)$$

Из граничных условий $\tau_{\rho z} = \beta\mu$ при $\rho = D/2$, $z = 0$ и $\tau_{\rho z} = -\beta\mu$ при $\rho = D/2$ и $z = h$ следует, что произвольные постоянные в выражении касательного напряжения таковы:

$$\left.\begin{aligned} C_5 &= \frac{4\beta\mu D}{(D^2 - d^2)h}; \\ C_7 &= \frac{2\beta\mu D}{D^2 - d^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (77)$$

Подставляя формулы (74) и (75) в выражение (69), получаем:

$$\sigma_z = (C_5 z - 2C_7)z + \frac{1}{12\beta}\frac{d^2}{\rho^2} + \frac{C_5}{2}\rho^2 - \frac{C_5 d^2}{4}\ln\rho + C_6. \qquad (78)$$

Подставляя формулу (78) в выражение (71) и используя граничное условие $\sigma_\rho = 0$ при $z = h$ и $\rho = D/2$, находим произвольную постоянную

$$C_6 = -\beta - \frac{d^2}{3\beta D^2} - \frac{C_5 D^2}{8} + \frac{C_5 d^2}{4}\ln\frac{D}{2}. \qquad (79)$$

Тогда окончательно

$$\sigma_z = -\beta + \frac{d^2}{3\beta}\left(\frac{1}{4\rho^2} - \frac{1}{D^2}\right) + (C_5 z - 2C_7)z - \frac{C_5}{4} \times \left(\frac{D^2}{2} - 2\rho^2 + d^2\ln\frac{2\rho}{D}\right). \qquad (80)$$

Подставив в выражение (79) $z = h$, с учетом соотношений (77) получим формулу нормальных напряжений на поверхности контакта с верхним инструментом:

$$\sigma_z = -\beta + \frac{d^2}{3\beta}\left(\frac{1}{4\rho^2} - \frac{1}{D^2}\right) - \frac{\beta\mu D}{h(D^2 - d^2)}\left(\frac{D^2}{2} - 2\rho^2 + d^2\ln\frac{2\rho}{D}\right). \qquad (81)$$

С учетом этого относительная удельная сила осадки полой заготовки на оправке

$$q = \frac{2\pi}{\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}}\int_{d/2}^{D/2}|\sigma_z|\rho d\rho = \beta\left\{1 + \frac{d^2}{3\beta^2}\left(\frac{1}{D^2} - \frac{2}{D^2 - d^2}\ln\frac{D}{d}\right) + \frac{\mu D}{4h(D^2 - d^2)^2}\left[(D^2 - 3d^2) \times (D^2 - d^2) + 4d^4\ln\frac{D}{d}\left[\ \right]\right]\right\}. \qquad (82)$$

В частном случае при $d = 0$ формула (82) переходит в формулу (24), что видно с учетом раскрытия неопределенности по правилу Лопиталя и того, что при осадке сплошной заготовки коэффициент Лоде $\beta = 1$. При осадке полой заготовки $\beta > 1$. Так как согласно третьему выражению системы (66) при $\rho = d/2$ $\xi_\theta = 0$, то деформированное состояние на поверхности контакта заготовки с оправкой является плоским, а, следовательно, здесь $\beta = 1{,}155$. С учетом этого в расчетах можно принимать среднее значение $\beta = 1{,}1$.

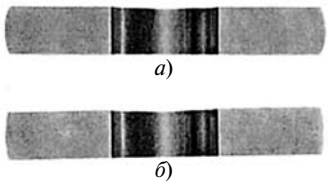
Текущее значение среднего наружного диаметра заготовки находится из условия постоянства объема:

$$D = \sqrt{d^2 + (D_0^2 - d^2)h_0/h}. \qquad (83)$$

Натуральное значение силы осадки определено выражением

$$P = \sigma_s \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)q. \qquad (84)$$

Поскольку осевую скорость v_z можно и в случае осадки полой заготовки задать в виде первого выражения системы (35), то накопленные деформации будут определяться



а)

б)

Рис. 11. Образцы из свинца С00, осаженные на оправке при μ = 0,5 (*а*) и 0,3 (*б*): D_0 = 40 мм, d = 16 мм, h_0 = 10 мм, h = 7 мм

Таблица 6

Сравнение расчетных P и экспериментальных $P_э$ значений силы осадки на оправке ∅ 16 мм полых заготовок из свинца С00 с σ_s = 19,4 МПа

D_0	h_0	h	D	μ	q	P	$P_э$	δ, %
мм						кН		
24	10,0	6,5	27,36	0,5	1,347	10,1	9,6	5,0
24	10,1	4,9	30,26	0,5	1,551	15,6	14,9	4,4
32	15,0	9,8	37,84	0,5	1,427	25,6	24,3	4,9
32	15,2	7,8	41,86	0,5	1,613	36,8	34,7	5,7
40	20,1	14,7	45,76	0,5	1,392	39,0	37,5	3,8
40	19,9	12,6	48,77	0,5	1,490	48,2	46,8	2,9
40	10,1	8,0	44,19	0,5	1,648	42,6	40,4	5,2
40	10,0	7,1	46,36	0,5	1,774	51,2	48,7	4,8
40	10,2	7,9	44,62	0,3	1,418	37,5	36,2	3,4
40	10,0	7,0	46,65	0,3	1,494	43,7	42,1	3,7

формулами, полученными выше для осадки сплошной заготовки. При осадке полой заготовки наиболее опасной точкой также является точка Б, расположенная посередине боковой поверхности заготовки, т. е. в месте наибольшей бочкообразности. Из выражения (10) с учетом формул (71) и (72) следует, что гидростатическое давление

$$\sigma = \frac{2\beta}{3} - \frac{d^2}{18\beta\rho^2} + \sigma_z. \qquad (85)$$

Подставив в равенство (85) формулу (80) с учетом выражений (77), получим при $z = h/2$ и $\rho = D/2$:

$$\sigma = -\frac{\beta}{3} - \frac{2d^2}{9\beta D^2} - \frac{\beta\mu Dh}{D^2 - d^2}. \qquad (86)$$

При $d = 0$ и $\beta = 1$ формула (86) принимает вид формулы (63).

Для проверки теоретических выражений автором были проведены эксперименты по осадке полых заготовок из свинца С00 на оправке ∅ 16 мм. Наружные диаметры заготовок выбирались из соотношений D_0/d = 1,5; 2,0; 2,5. Так как при осадке полых заготовок может происходить отход внутренней поверхности от оправки, то для его предотвращения при выборе h_0 учитывали данные работы [9]. С этой же целью большинство образцов обезжиривали, а их торцы натирали мелом. В двух последних опытах торцы заготовок смазывали машинным маслом. Типовые осаженные образцы показаны на рис. 11. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 6. При расчете последовательно использовали формулы (83), (82) и (84).

Дополнительная экспериментальная проверка и практическое использование формул для осадки полой заготовки на оправке будут представлены в статье, посвященной исследованию высадки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воронцов А. Л.** Теория малоотходной штамповки. М.: Машиностроение, 2005. 859 с.
2. **Охрименко Я. М., Тюрин В. А.** Теория процессов ковки. М.: Высшая школа, 1977. 295 с.
3. **Теория** обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. М.: Металлургиздат, 1963. 672 с.
4. **Сторожев М. В., Попов Е. А.** Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.
5. **Смирнов-Аляев Г. А.** Сопротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
6. **Холодная** объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. М: Машиностроение, 1973. 496 с.
7. **Колмогоров В. Л.** Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
8. **Головин В. А., Дмитриев А. М., Воронцов А. Л.** Технология ковки и объемной штамповки. Ч. 2. Малоотходная объемная штамповка. Учебник для вузов. М: Машиностроение, 2004. 434 с.
9. **Воронцов А. Л.** Технологические задачи теории пластичности. Т. 3. М.: Машиностроение. 2006. 475 с.

ЗЛАТОУСТОВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД

ТОРГОВЫЙ ДОМ ЭСТАР
ЭЛЕКТРОСТАЛЬ РОССИИ

Производство проката из любых марок стали и сплавов: жаропрочных, нержавеющих, быстрорежущих, инструментальных, подшипниковых, конструкционных, углеродистых.

КРУГ	1—280 мм (катаный, кованый, калиброванный, со специальной отделкой поверхности)
КВАДРАТ	5—300 мм (катаный, кованый, калиброванный)
ТРУБНАЯ ЗАГОТОВКА	80—200 мм
ШЕСТИГРАННИК	4—52 мм (катаный, калиброванный)
ПОЛОСА, ПРОВОЛОКА, СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ	

МАЛОТОННАЖНЫЕ ЗАКАЗЫ, СБОРНЫЕ ВАГОНЫ.

Заключением договоров на поставку продукции занимается ООО «Торговый дом "ЭСТАР-Златоуст"»

Тел. (3513) 69-67-44, 67-66-22. Факс (3513) 67-43-32, 67-68-66, 67-31-76

E-mail: td@zmk.ru www.zmk.ru

УДК 303.82.001.63.007.62

А. В. АНДРЕЙЧИКОВ, О. Н. АНДРЕЙЧИКОВА, доктора технических наук (Волгоградский ГТУ)

Метод эволюционного синтеза сложных технических объектов с использованием экспертных знаний[1]

Описан новый подход к структурному синтезу многомерных инновационных решений, основанный на применении механизмов естественной эволюции для соединения элементов и отбора жизнеспособных решений. Техническое решение генерируется из множества элементов только в том случае, если удовлетворяются их взаимные внутренние требования. Для формирования описаний порождаемых конструкций используются знания экспертов, представленные в виде правил и функций. Лучшие решения отбираются на основе обобщенной меры сходства с техническим заданием. Метод позволяет генерировать решения, не имеющие внутренних противоречий и удовлетворяющие внешним требованиям.

A new approach to the structural synthesis of multivariate innovative solutions is described, based on the application of natural evolution mechanisms to join elements and select viable decisions. Technical decision is generated from a member set only in case if mutual internal requirements meet. In order to form descriptions of the borne structures experts' knowledge in the form of rules and functions is used. The best decisions are sorted out on the base of generalized measure of similarities to the preliminary specifications. The method allows for generating solutions which do not have internal contradiction and meet external requirements.

Процессы развития в естественных системах послужили аналогами разработанных методов обработки информации в искусственных системах. Рассмотрим эволюционный подход к решению задачи концептуального проектирования сложных объектов, заключающейся в создании модели некоторой системы, реализация которой будет способна выполнять предписанные функции с заданным уровнем качества. Требования, предъявляемые к объекту проектирования, формируются в метасистеме более высокого уровня, которая является антропогенной развивающейся системой. В связи с этим цели и требования к системе более низкого уровня (подсистеме) могут изменяться с течением времени. Поэтому задачи концептуального проектирования технических инноваций, производственных или других систем можно отнести к динамическим задачам принятия проектных решений в условиях неопределенности. В данном случае неопределенность характеризуется многовариантностью, многокритериальностью, открытостью в плане постоянного обмена информацией с внешней средой и способностью изменять свои свойства и структуру при изменении факторов внешнего окружения, т. е. адаптивностью. Эффективное решение подобных задач основано на применении эволюционного подхода к задачам проектирования. Схема эволюционного проектирования показана на рис. 1.

Информация об изменениях внешней среды используется для построения модели поведения. Результаты моделирования позволяют сформировать вектор $R(t)$ требований к проектируемой системе, изменяющийся во времени, на основе которого синтезируются варианты системы (S_1, S_2, S_3 ..., S_n) и выбирается вариант, имеющий совокупность свойств $P_1 = F(S_1)$, $P_2 = F(S_2)$, $P_3 = F(S_3)$, которые являются функцией структуры, наилучшим образом удовлетворяющей внешним требованиям $R(t)$.

В процессе построения конфигурации целостной системы из более простых частей учитываются факторы внешней среды, при этом структура и состав элементов системы подбираются так, чтобы обеспечить максимальное удовлетворение внешним требованиям. Таким способом реализуется один из основных принципов эволюционного подхода — *естественный отбор*. В процессе синтеза происходит соединение отдельных элементов, результатом которого являются более крупные объекты, обладающие новыми свойствами и наследующие некоторые свойства элементов "родителей". При этом могут использоваться механизмы *наследования*,

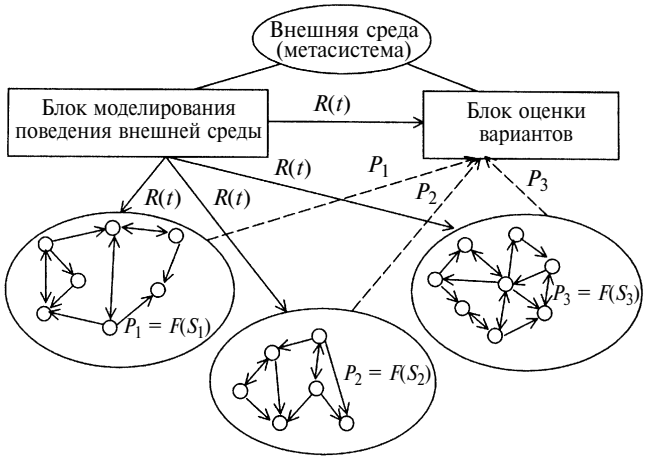


Рис. 1. Схема эволюционного проектирования

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номера проектов 05-68-01466, 05-08-01470.

мутации и *межвидовой рекомбинации*, поскольку объединяемые в систему элементы могут описываться различными наборами свойств. Из множества возможных элементов на каждом шаге отбираются только те, в которых отсутствуют внутренние противоречия и имеются высокие шансы "выживания" во внешней среде.

Задачи синтеза сложных систем существенно отличаются от оптимизационных (таблица), поэтому для их решения необходима существенная модификация известных генетических алгоритмов [1—3].

Это связано с тем, что в синтезе сложной системы участвуют объекты с различными структурами описаний, в то время как в процессе оптимизации рассматриваются объекты с идентичными описаниями. Другими словами, состав "популяций" объектов синтеза разнороден, т. е. содержит множество видов, а в процессе синтеза возможно межвидовое скрещивание (рекомбинация). Кроме того, описания объектов синтеза представляют собой наборы структурированных данных различных типов, а не двоичные цепочки генов, которые используются в алгоритмах оптимизации. Поэтому в процессе синтеза возникают проблемы формирования структур описаний потомков и выбора претендентов для скрещивания, так как это возможно только между определенными видами, присутствующими в популяции. В известных генетических алгоритмах проблемы отбора родителей и формирования описаний потомков успешно решаются с использованием механизмов случайного выбора. В задачах синтеза применение случайного отбора и комбинирования ограничено.

Отличия алгоритмов эволюционного синтеза от генетических алгоритмов оптимизации

Термин	Оптимизация	Синтез
Объект популяции	Решения, заданные координатами точек в N-мерном пространстве	Элементы технической (производственной и т. п.) системы, описанные произвольными наборами структурированных данных
Структура описания объектов популяции	Одинаковая	Различная
Характер описания объектов	Количественный	Количественный, качественный, нечеткий и т. д.
Возможность скрещивания	Между любыми объектами одной популяции	Только тех объектов, которые удовлетворяют определенным условиям
Структура потомков, появляющихся в результате скрещивания	Аналогична структуре описания обоих родителей	Формируется новая структура, описывающая объект-потомка, которая отличается от структуры, описывающей родителей
Число родителей, порождающих потомка	Два	Не менее двух
Число потомков, появляющихся в результате скрещивания	Два	Один
Способ формирования описания потомка	Обмен участками описаний (хромосом) родителей	Заданные процедуры вычисления и/или вывода свойств потомка из свойств родителей
Способ отбора лучших представителей популяции	На основе сравнения значений произвольной целевой функции	На основе целевой функции, отражающей степень удовлетворения синтезированных объектов заданным требованиям

Основные этапы эволюционного подхода к синтезу сложного технического объекта (ТО):

1. Создание популяции исходных объектов синтеза, которая представляет собой множество альтернативных реализаций функциональных подсистем (ФПС), наделенных определенными свойствами и имеющих требования к своему окружению внутри системы. Формирование множества ФПС осуществляется на основе функционально-структурного или морфологического анализа рассматриваемого класса [4]. Результат декомпозиции может представлять собой множество ФПС или иерархию таких множеств.

2. Формирование набора обобщенных требований к синтезируемому объекту, отражающего его жизнеспособность или эффективность. Если структура ТО задана иерархией, то формулируются также требования к подсистемам, имеющим внутреннее строение.

3. Формирование функции ценности вариантов проектируемого ТО, позволяющей оценивать степень соответствия сгенерированных объектов заданному набору внешних требований. При иерархическом представлении задается набор таких функций.

4. Выбор претендентов и реализация оператора скрещивания, с помощью которого из объектов исходной популяции создаются новые объекты-представители следующей популяции и формируются их описания.

5. Вычисление значений функции ценности сгенерированных вариантов и отбор на их основе лучших вариантов из новой популяции.

6. Проверка условий завершения процесса синтеза.

Представление знаний об объектах синтеза

Рассмотрим представление знаний, используемых в процессе синтеза систем на основе эволюционного подхода. Допустим, структура синтезируемой системы S задана графом (рис. 2).

Варианты целостной системы могут содержать не более N элементов S_i, где $i = 1, 2, ..., N$. Вариант целостной системы V_q может содержать $N_l < N$ элементов в том случае, если в конструкцию входят многофункциональные элементы. Набор информации, используемой для синтеза, может включать в себя различные характеристики, представленные совокупностью свойств каждой подсистемы S_i: $P_i = \{Y_{i1}, Y_{i2}, ..., Y_{iKi}\}$, где K_i — число свойств i-й подсистемы, $i = 1, ..., N$. Эти харак-

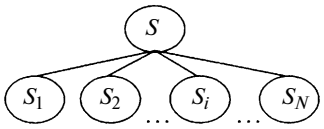


Рис. 2. Структура синтезируемой системы

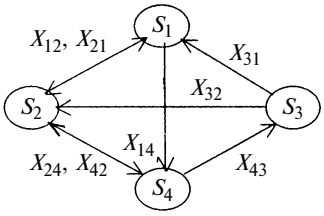


Рис. 3. Граф взаимных требований подсистемы

теристики можно взять, например, из баз знаний по техническим решениям [4]. В отличие от традиционных бинарных цепочек генов свойства ФПС могут быть представлены целыми или вещественными числами, а также символьными строками или нечеткими множествами. Кроме набора свойств каждая подсистема S_i описывается набором требований к ее внутреннему окружению (к другим элементам): $R_i = \{X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{iMi}\}$, где M_i — число требований i-й подсистемы к другим подсистемам.

Порядок взаимных требований подсистем можно задать с помощью графа (рис. 3).

В матрице B, представляющей граф, приведенный на рис. 2, элементы соответствуют числу требований, которые предъявляет элемент системы S_i, указанный в i-й строке, к элементу системы S_j, указанному в j-м столбце. Первый индекс любого требования X_{ij} совпадает с индексом подсистемы (элемента системы), которая выдвигает это требование. Второй индекс является порядковым номером требования в списке требований R_j.

Важным моментом является установление соответствия между свойствами ФПС и требованиями, которые к ней предъявляются со стороны других подсистем. С этой целью заполняются матрицы соответствия C_i для каждой ФПС S_i, которые являются промежуточным представлением объектов синтеза, удобным для дальнейшей обработки.

Пример матрицы соответствия для S_1:

$$B = \begin{array}{c} \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{array} \\ \begin{Vmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \end{array}; \quad C_1 = \begin{array}{c} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_N \\ X_1^* \end{array} \begin{Vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1K1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & — \\ X_{31} & — & \dots & — \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ — & — & — & — \\ X_{11}^* & X_{12}^* & \dots & X_{1K1}^* \end{Vmatrix}.$$

В первой строке матрицы соответствия записываются наименования свойств i-й подсистемы, в последующих $(N - 1)$ строках — наименования требований, которые другие подсистемы предъявляют к соответствующим свойствам S_i. В последней строке матрицы C_i, $i = 1, 2, ..., N$, записываются результаты объединения всех требований, предъявляемых к j-му свойству i-й подсистемы (X_{ij}^*), вычисляемые после подстановки конкретных значений в переменные X_{ij}, которая осуществляется в процессе синтеза. Альтернативные реализации каждой ФПС описываются двумя таблицами, в которых хранятся конкретные значения свойств (y_{ikj}) и требований (x_{ikj}). Значениями свойств являются числа или текстовые данные, значениями требований — ограничения в виде равенств или неравенств. При таком представлении принимается допущение: все альтернативные реализации i-й подсистемы описываются одинаковым числом свойств (K_i) и одинаковым числом внутренних требований (M_i). Общее число свойств или требований каждой подсистемы можно получить путем объединения соответствующих характеристик альтернативных реализаций A_{ij}.

Описания альтернативных реализаций ФПС удобно представить с помощью матриц вида:

$$PA_i = \begin{array}{c} S_i \\ A_{i1} \\ A_{i2} \\ \dots \\ A_{iLl} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{iKi} \end{array} \\ \begin{Vmatrix} y_{11} & y_{21} & \dots & y_{K11} \\ y_{12} & y_{22} & \dots & y_{K12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1Ll} & y_{2Ll} & \dots & y_{K1Ll} \end{Vmatrix} \end{array};$$

$$RA_i = \begin{array}{c} S_i \\ A_{i1} \\ A_{i2} \\ \dots \\ A_{iLl} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{iMi} \end{array} \\ \begin{Vmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{M11} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{M12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1Ll} & x_{2Ll} & \dots & x_{M1Ll} \end{Vmatrix} \end{array}.$$

Таким образом, совокупность знаний для эволюционного синтеза включает в себя знания:

о ФПС, из которых синтезируется объект (векторы P_i, R_i, $i = 1, 2, ..., N$, матрица B, матрицы соответствия C_i, $i = 1, 2, ..., N$);

о конкретных реализациях ФПС, представленных свойствами и требованиями к внутреннему окружению (наборы матриц PA_i, RA_i, $i = 1, 2, ..., N$), набором внешних требований к синтезируемому объекту $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, ..., R_{GM}\}$ (где M — число внешних требований) и множеством правил и процедур формирования описаний порождаемых объектов-потомков.

Значения свойств целостной системы, которые должны удовлетворять внешним требованиям, можно получить разными способами. Характеристики, представленные количественными оценками при морфологическом подходе к синтезу, можно получить с помощью аддитивной и мультипликативной сверток [4, 5]. Логический подход к синтезу предусматривает применение формул логики предикатов (правил) для формирования характеристик целостного объекта на основе свойств элементов, что расширяет возможности представления знаний, но требует дополнительной информации [6]. Эволюционный подход к синтезу допускает применение разных способов получения параметров. Это могут быть математические и алгоритмические функции, правила, а также комбинированное представление. Выбор конкретного способа зависит от количества доступной информации. При недостатке знаний для вычисления параметров может использоваться аддитивный или мультипликативный обобщенный крите-

рий. Процедура вычисления компонент вектора $P_G = \{P_{G1}, P_{G2}, ..., P_{GK}\}$ для варианта целостной системы V_q может иметь вид:

$$P_{G1} = Y_{11};\ P_{G2} = \max_{Si \in V_q} (Y_{i2});\ P_{G3} = \sum_{i=1}^{N} Y_{i3};$$

$$(P_{G4} = \lambda_1) \to (Y_{21} \leqslant \lambda_2) \wedge (Y_{31} = \lambda_3);\ ...,\ ...$$

где λ_i — константы, определяемые техническим заданием на синтез.

Реализация оператора скрещивания

Рассмотрим процедуру соединения N элементов с различными описаниями, соответствующую оператору скрещивания в генетических методах поиска оптимальных решений. Заметим, что в данном случае потомок происходит от N родителей. Отбор кандидатов для скрещивания основан на вычислении степени удовлетворения взаимных требований соединяемых элементов. Для каждого элемента (ФПС) синтезируемого объекта вычисляется мера удовлетворения требованиям остальных элементов, претендующих войти в q-ю комбинацию, в соответствии с формулами:

$$G_{qi} = \frac{1}{K_j} \sum_{j=1}^{K_i} L(X_{ij}^*, Y_{ij}) \text{ или}$$

$$G_{qi} = \sum_{j=1}^{K_i} w_j L(X_{ij}^*, Y_{ij}),$$

где $L(X_{ij}^*, Y_{ij})$ — мера сходства j-го свойства i-й ФПС Y_{ij} с объединенным набором требований к ней со стороны остальных элементов X_{ij}^*; w_j — нормированные весовые коэффициенты требований к j-му свойству i-й ФПС; K_i — число свойств i-й ФПС.

Способ вычисления меры сходства зависит от вида описания свойств (дескриптивный, количественный, нечеткий) и от вида требований (равенство, неравенство, интервал), что подробно описано в работе [7].

Обобщенная оценка степени удовлетворения взаимных требований элементов в q-м варианте системы вычисляется либо как среднее арифметическое, либо как среднее геометрическое в зависимости от выбранного принципа компромисса:

$$G_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} G_{qi} \text{ или } G_q = \left[\prod_{i=1}^{N} G_{qi} \right]^{1/N}.$$

Аддитивная функция G_q принимает нулевое значение только в том случае, если все ФПС, вошедшие в q-й вариант, не удовлетворяют требованиям остальных элементов. Мультипликативная функция принимает нулевое значение, когда в комбинацию входит хотя бы один элемент, для которого $G_{qi} = 0$. Поэтому вторая функция является более эффективной для поиска вариантов с высокой степенью совместимости ФПС. При использовании аддитивной функции проверку на наличие внутренних противоречий следует проводить с использованием некоторого порога Δ, $G_q \geqslant \Delta$. В случае мультипликативной функции проверка может выполняться по условию $G_q > 0$.

Таким образом, для любого генерируемого варианта системы $V_q = \{A_{1i}, A_{2j}, A_{3k}, ..., A_{Nz}\}$ вычисляется значение функции G_q и на его основе принимается решение о возможности существования данной комбинации ФПС. Если это решение отрицательное, то вариант V_q не порождается и не включается в новую популяцию. В противном случае формируется описание полученного варианта с использованием соответствующей процедуры вывода интегральных свойств объекта, который будет участвовать в последующем отборе на основе значений функции F_q, отражающей жизнеспособность целостного объекта во внешней среде. Таким образом выполняется скрещивание N разнородных объектов с учетом их совместимости в рамках единой конструкции. В данном случае не происходит никакого обмена фрагментами "хромосом", как в генетических алгоритмах, поскольку описания элементов являются структурированными и разнородными, взаимный обмен фрагментами таких описаний лишен какого-либо смысла.

Описание потомка, полученного от N родителей, формируется с помощью специальных процедур вычисления свойств, заложенных в базу знаний. Если соединение выбранных реализаций ФПС ($S_1, S_2, ..., S_N$) является допустимым ($G_q > 0$), то образование потомка V_q можно представить грамматическим правилом вида:

$$S(P_{G1}, P_{G2}, ..., P_{GK})$$

$$\to S_1(Y_{11}, Y_{12}, ..., Y_{1K1}), S_2(Y_{21}, Y_{22}, ..., Y_{2K2}), ...,$$
$$S_N(Y_{N1}, Y_{N2}, ..., Y_{NKN}), \{P_1 = Y_{11};\ P_2 = \max(Y_{1j}, Y_{2j});$$
$$P_3 = \sum_i Y_{i3}, ..., (P_L = \lambda_r) \to (Y_{3K3} < \lambda_u) \wedge (Y_{NK} = \lambda_g)\}$$

$$\to S_1(Y_{11}, Y_{12}, ..., Y_{1K1}), S_2(Y_{21}, Y_{22}, ..., Y_{2K2}), ...,$$
$$S_3(Y_{31}, Y_{32}, ..., Y_{3K3}), \{P_1 = Y_{11};\ P_2 = \max(Y_{1j}, Y_{2j});$$
$$P_3 = \sum_i Y_{i3}, ..., (P_L = \lambda_r) \to (Y_{3K3} < \lambda_g)\}$$

$$\to ...$$

Здесь в фигурных скобках показаны примеры процедур вычисления свойств целостного объекта на основе параметров элементов. С помощью правил представлены знания о структуре описаний потомков. В случае иерархического синтеза следует сформулировать правила формирования описаний потомков для каждой популяции. При недостатке знаний для построения правил можно осуществить объединение качественных признаков и суммирование значений одноименных количественных признаков объектов-родителей.

Отбор жизнеспособных вариантов

После того как сформирована процедура получения значений параметров целостной системы, значения функции ценности вариантов можно вычислить как меру сходства вектора внешних требований R_G со свойствами конкретного варианта $P_G(V_q)$. Функция ценности

должна отражать жизнеспособность синтезированных вариантов системы во внешней среде. Для ее построения необходимо сформулировать требования окружения к объекту проектирования $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, ..., R_{GM}\}$, где M — число внешних требований. Эти требования обычно сопряжены с выполнением определенного набора функций и заданным уровнем качества ТО. Требования к синтезируемому объекту могут представлять собой равенства или неравенства, в которые входят свойства сгенерированного объекта $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, ..., R_{GK}\}$ и константы $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_H\}$, выражающие специфику технического задания на синтез.

Обобщенную оценку удовлетворения внешних требований можно построить как аддитивную или мультипликативную комбинацию мер сходства:

$$F_q = \sum_{j=1}^{L} w_j L(R_{Gj}, P_{Gj}^q) \text{ или}$$

$$F_q = \prod_{j=1}^{L} [L(R_{Gj}, P_{Gj}^q)]^{w_j},$$

где w_j — нормированные весовые коэффициенты внешних требований; P_{Gj}^q — зачение j-го свойства q-го варианта системы.

Множество жизнеспособных вариантов формируется с использованием задаваемого порога Δ, а лучшие варианты определяются по максимальным значениям: $F^* = \max_{q \in \Omega} F_q$, где Ω — множество синтезированных вариантов ТО.

Если структура проектируемой системы задана иерархией, необходимо сформировать функции ценности для всех подсистем, имеющих сложную внутреннюю структуру.

Алгоритмы эволюционного синтеза

В зависимости от объема знаний о проектируемой системе и от ее сложности эволюционный синтез можно проводить в различной последовательности. В случае одноуровневого представления проектируемой системы алгоритм синтеза включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Подготовка и ввод исходной информации, содержащей описания ФПС в виде набора свойств и требований, граф взаимных требований ФПС и матрицы соответствия требований свойствам. В базу знаний системы эволюционного синтеза помещается процедура (грамматика) вычисления параметров синтезируемой системы через параметры составляющих элементов. Пользователь должен также сформировать набор внешних требований к синтезируемой системе.

Шаг 2. Генерируется вариант V_q из N реализаций функциональных подсистем, выбранных случайным образом из соответствующих множеств. При небольшой мощности множеств альтернативных реализаций ФПС генерируется множество всех возможных вариантов целостной системы путем полного перебора.

Шаг 3. Вычисляются оценки меры удовлетворения требований для каждой подсистемы G_{qi} и обобщенная оценка для варианта G_q.

Шаг 4. Если $G_q \geqslant \Delta$, то формируется описание варианта $V_q(P_{G1}, P_{G2}, ..., P_{GM})$ с использованием заданной процедуры вычисления свойств целостного объекта. Если $G_q < \Delta$, то вариант исключается из популяции и происходит возврат на шаг 2.

Шаг 5. Вычисляется значение функции ценности варианта F_q, которое используется для отбора жизнеспособных вариантов. Отбор может проводиться по условию $F_q \geqslant \Delta$ или путем запоминания заданного числа вариантов с наилучшими значениями F_q.

Шаг 6. Повторяются шаги 2÷5 до тех пор, пока не будет выполнено условие завершения синтеза. Синтез заканчивается, когда значения F_q перестают улучшаться либо достигается заданное число шагов.

В данном алгоритме формируется единственная популяция, членами которой являются варианты системы, полученные от N родителей и содержащие N ФПС. При большом числе альтернативных реализаций ФПС этот алгоритм может включать в себя процедуру предварительного отбора родителей. Следует иметь в виду, что родители имеют различные описания, поэтому для их оценки надо применять либо разные оценочные функции, либо усредненные оценки по множеству критериев качества.

В приведенном алгоритме не учитывалось наличие подсистем, способных выполнять несколько функций. При наличии таких подсистем варианты проектируемой системы могут содержать число элементов $N_1 < N$. Список выполняемых функций включается в множество свойств объектов синтеза. Функции, выполняемые целостной системой, могут отличаться от объединенного набора функций, которые выполняют подсистемы. Поэтому в набор правил формирования свойств целостной системы (грамматику) необходимо добавить правила вывода функций целостной системы.

В приведенном алгоритме не учитывалось наличие многофункциональных элементов. Если такие элементы входят в состав системы, то число ее компонентов может быть уменьшено. Для синтеза объектов с переменным числом элементов в описание объектов синтеза включаются списки выполняемых ими функций. Если в этом списке появляются одноименные функции, то элементы, обеспечивающие дублирование функций, можно исключить из конструкции. В списке требований к проектируемому объекту отмечаются функции, выполнение которых является обязательным. При исключении элементов из состава устройства осуществляется контроль за сохранением обязательных функций. Эти действия выполняются на втором шаге приведенного алгоритма. При этом порождается не один, а несколько вариантов, отличающихся числом элементов. Таким образом, объекты синтеза заменяются схемами, в которых свободными переменными являются необязательные функции.

Приведенный алгоритм синтеза основан на одновременном скрещивании N элементов и одношаговой процедуре порождения потомков. Рассмотрим меха-

низм эволюционного синтеза, основанный на последовательном соединении элементов. В этом случае в процессе синтеза участвуют исходная популяция базовых объектов и множество популяций потомков. Алгоритм последовательного синтеза включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Подготовка и ввод исходной информации.

Шаг 2. Формирование начальной популяции объектов синтеза с использованием или без использования процедуры предварительного отбора.

Шаг 3. Образование новых объектов, включающих два элемента. Управление процессом соединения элементов осуществляется с использованием графа взаимных внутренних требований. Два объекта соединяются, если между ними есть связь. В случае если граф требований является несвязным, то вершины, не имеющие связей, участвуют в синтезе на самом последнем этапе. Для задач небольшой размерности осуществляется синтез всех комбинаций. При большом числе элементов случайным образом генерируется популяция ограниченного размера.

Шаг 4. Проверка на совпадение функций, выполняемых элементами в полученной комбинации. Если множество функций, выполняемых одним элементом, является подмножеством функций другого, комбинация заменяется этим элементом и управление передается на шаг 7. В противном случае формируется список функций, выполняемых новым объектом. Если имеется частичное совпадение функций, выполняемых соединяющимися элементами, то дублирующиеся функции помечаются в списке специальной меткой.

Шаг 5. Вычисление шести оценок степени удовлетворения требований для каждой подсистемы G_q, входящей в полученную комбинацию, и обобщенной оценки G_q, вычисляемой путем перемножения. Если $G_q > 0$, то формируется описание комбинации V_q путем объединения описаний элементов. В описание также включаются индексы вошедших подсистем. Значение G_q включается в описание комбинации. Если $G_q = 0$, комбинация исключается из рассмотрения и осуществляется возврат на шаг 3.

Шаг 6. Формирование свойств нового объекта с использованием заданных правил и набора его требований к окружению путем объединения требований родителей.

Шаг 7. Варианты, прошедшие проверку на шаге 5, включаются в новую популяцию. При этом возможно применение дополнительного условия отбора на основе обобщенной оценки по критериям качества.

Шаг 8. Проверка на выполнение требований объектов новой популяции к внутреннему окружению. Если не все требования удовлетворены, объект участвует в дальнейшем синтезе. Осуществляется переход на шаг 3, где происходит поиск кандидатов для скрещивания, управляемый невыполненными требованиями, в противном случае — переход к шагу 9.

Шаг 9. Проверка на полноту функций, которые должна выполнять синтезируемая система. Если описание сгенерированного варианта содержит все заданные функции, описание полученного объекта включается в популяцию готовых вариантов и осуществляется переход на шаг 12, в противном случае — переход на шаг 7.

Шаг 10. Возврат к шагу 3, где генерируются новые объекты путем присоединения элементов исходной популяции к членам новой популяции (процесс управляется графом требований).

Шаг 11. Повторение шагов 3÷10 до выполнения условия окончания синтеза. Таким условием является завершение обхода графа требований, включая отдельные вершины.

Шаг 12. Отбор вариантов из популяции целостных систем на основе значений функции ценности F_q. Если $F_q \geqslant \Delta$, то описание варианта V_q записывается в файл результатов. В задачах небольшой размерности имеет смысл сделать полный перебор, в противном случае осуществляется случайный отбор заданного числа вариантов с максимальными значениями функции F_q.

Выводы

1. Предложен метод эволюционного синтеза многомерных инновационных решений, основанный на применении механизмов естественной эволюции для соединения элементов и отбора жизнеспособных решений, особенность которого состоит в том, что описания порождаемых конструкций формируются на основе знаний экспертов, представленных в виде правил и функций. Лучшие решения отбираются на основе обобщенной меры сходства с техническим заданием. Генерируемые решения не имеют внутренних противоречий и удовлетворяют внешним требованиям.

2. Метод эволюционного синтеза инвариантен к объекту проектирования.

3. Применение метода наиболее предпочтительно на начальных стадиях проектирования (стадиях исследовательского проектирования).

4. Знания экспертов, закладываемые для решения задач проектирования определенного функционального класса технических систем, могут неоднократно использоваться при разных исходных технических заданиях.

5. Компьютерный вариант метода эволюционного синтеза позволяет получать работоспособные и оригинальные решения за короткое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стецюра Г. С.** Эволюционные методы в задачах управления, выбора и оптимизации // Приборы и системы управления. 1998. № 3. С. 54—62.
2. **Норенков И. П., Косачевский О. Т.** Генетические алгоритмы комбинирования эвристик в задачах дискретной оптимизации // Информационные технологии. 1999. № 2. С. 2—7.
3. **Курейчик В. М.** Генетические алгоритмы. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 242 с.
4. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения). М.: Машиностроение, 1998. 476 с.
5. **Андрейчиков А. В., Киселев А. С.** Эволюционный синтез новых технических систем на основе морфологических таблиц // Известия вузов. 2002. № 2—3. С. 44—48.
6. **Андрейчиков А. В.** Интеллектуальный метод синтеза технологических инноваций // Известия вузов. 2003. № 10. С. 47—62.
7. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Интеллектуальные информационные системы. М.: Финансы и статистика, 2004. 464 с.

УДК 658:330.106

И. Н. ОМЕЛЬЧЕНКО, д-р техн. и экон. наук, А. Г. ЛАЗАРЕНКО (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Графоаналитическое решение логистической задачи о максимальном сетевом потоке минимальной стоимости

Рассмотрено решение задачи о нахождении максимального сетевого потока минимальной стоимости, которое базируется на методе Форда-Фалкерсона и отличается упрощенным математическим аппаратом. Упрощение достигнуто введением дополнительных ограничений в начальные условия задачи и включением в механизм ее решения элементов графического анализа.

Problem solution on finding maximal network flow of minimum value is considered. This solution is based on the Ford—Falkerson method and differs by simplified mathematical tool. Simplification is reached due to additional limitations introduction into initial problem specifications and graphical analysis elements inclusion into the mechanism of its solution.

В современных проектах, связанных с разработкой сложных технических систем, важное место занимают вопросы рациональной организации материальных, функциональных, информационных и других потоков. При этом в качестве инструмента проектирования логистических процессов систем во многих случаях используется обобщенная модель оптимизации потоков с помощью "направленных сетей". Фундаментальная теоретическая разработка этой проблемы [1, 2] выполнена Л. Фордом и Д. Фалкерсоном, которые предложили строгую математическую постановку задачи о потоках на "направленных сетях" и описали механизм ее решения. В работах авторов, рассматривающих общую теорию потоковых задач, затронуты также прикладные аспекты проблемы. Тем не менее эти монографии являются в первую очередь академическими трудами, ориентированными на широкие теоретические обобщения. Поэтому ввиду существующей и постоянно возрастающей потребности в прикладных подходах к решению задач о потоках метод Форда—Фалкерсона получил дальнейшее развитие в ряде работ [3—6], направленных на поиск инженерных методологий сетевой потоковой оптимизации.

Настоящая работа преследует аналогичную цель и ориентирована в первую очередь на применение в области логистики. Ниже рассмотрено решение задачи о нахождении максимального сетевого потока минимальной стоимости, которое базируется на методе Форда—Фалкерсона и отличается от последнего упрощенным математическим аппаратом. Упрощение достигнуто введением дополнительных ограничений в начальные условия рассматриваемой задачи, а также включением в механизм ее решения элементов графического анализа.

Ключевым понятием потоковых задач является понятие "направленная сеть" (далее — сеть), в которое вкладывается [1, 2] следующее содержание: сеть $N = E \cup A$ — это ориентированный взвешенный граф, являющийся совокупностью множества элементов $E = \{x, y, ...\}$ и множества упорядоченных пар элементов $A = \{(x, y), ...\}$, которым присвоены весовые параметры. Множества E и A являются множествами соответственно вершин сети и взвешенных дуг сети.

Задача о максимальном сетевом потоке минимальной стоимости заключается в следующем.

Задана "направленная сеть", с помощью которой анализируемый логистический процесс моделируется потоком F^N, переносящим по сети некоторые абстрактные объекты — элементы потока. Поток сети перемещается из вершины-источника s к вершине-стоку t через промежуточные вершины x по дугам сети (x, y). Множество дуг A сети нагружено тремя весовыми функциями: функцией текущего потока на дугах сети $F = \{f(x, y)\}\ \forall\ (x, y) \in A$, функцией пропускной способности дуг $L = \{l(x, y)\}\ \forall\ (x, y) \in A$ и функцией стоимости дуговых потоков $P = \{p(x, y)\}\ \forall\ (x, y) \in A$.

Требуется определить максимальный общий поток сети ${}^{\max}F^N$, имеющий минимальную стоимость ${}^{\min}P^N$.

Решение рассматриваемой задачи предполагает выполнение базовых ограничений Форда—Фалкерсона и дополнительных ограничений, введенных нами для адаптации задачи к логистической специфике. Ограничения Форда—Фалкерсона предъявляют к потокам следующие требования: стационарность; целочисленность; ограниченность; начальное нулевое значение; баланс входящих и исходящих потоков на дугах, инцидентных промежуточным вершинам сети, а также равенство сетевого потока сумме потоков на дугах, инцидентных вершине-источнику, и на дугах, инцидентных вершине-стоку.

$$\left.\begin{aligned}
&f(x, y),\ l(x, y),\ p(x, y) = \text{const};\\
&F,\ L,\ P = \text{int}\{f(x, y)\},\ \text{int}\{l(x, y)\},\ \text{int}\{p(x, y)\};\\
&l(x, y) \geqslant f(x, y) \geqslant 0;\\
&{}^{0}f(x, y) = 0;\\
&\sum_{x \in E} f(x_{m-1}, x_m) - \sum_{x \in E} f(x_m, x_{m+1}) = 0,\ \forall\ x \neq s \wedge t);\\
&\sum_{v \in E} f(s, y) = \sum_{x \in E} f(x, t) = |F^N|.
\end{aligned}\right\}$$

Дополнительные ограничения требуют, чтобы сеть была двухполюсной, а дуги сети обладали односторонней проводимостью:

$$\left.\begin{aligned}
&\exists\ s \wedge t = !\ |s \wedge t \in N);\\
&F = \{f(x, y)\}|f(x, y) = f(x, y) \wedge f(y, x) = 0\ \forall\ (x, y) \in A.
\end{aligned}\right\}$$

Решение задачи о максимальном потоке минимальной стоимости складывается из трех основных процедур:

1) формирование исходных данных;

2) нахождение вариантов максимального потока сети;

3) определение максимального потока минимальной стоимости.

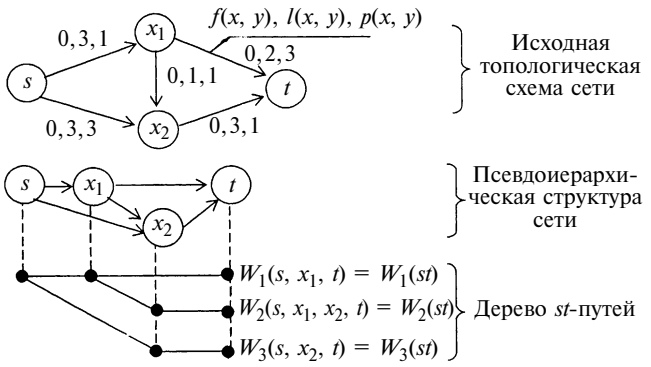


Рис. 1. Пример формирования псевдоиерархической структуры сети и построения дерева путей

Вторую процедуру удобно выполнять с применением механизма графоаналитического анализа, который требует введения условного понятия "псевдоиерархическая структура сети". Под последней будем понимать графическую модель заданной сети, отображенную на системе иерархических уровней. Причем каждому уровню псевдоиерархии ставится в соответствие одна из вершин сети таким образом, что верхний уровень структуры принадлежит вершине-источнику, нижний — вершине-стоку, а остальные уровни принадлежат промежуточным вершинам (рис. 1).

Формирование исходных данных заключается в описании исходной топологии сети $N = E \cup A$, в задании весовой функции сети $\{F, L, P\}$ и в формировании псевдоиерархической структуры. Исходная топология и псевдоиерархическая структура сети обычно представляются в виде матрицы инциденций или в виде графической схемы. Весовая функция сети как функция, отображающая множество дуг (x, y) сети в множество действительных чисел $f(x, y)$, $l(x, y)$ и $p(x, y)$, поставленных в однозначное соответствие дугам (x, y), задается либо в виде меток на графической схеме сети, либо в табличном виде.

Процедура нахождения вариантов максимального потока сети складывается из решения следующих задач: выявления путей сети; определения сетевых потоков; определения максимального общего потока сети.

Решение перечисленных задач нуждается в рассмотрении только сквозных st-путей сети, т. е. путей $W(st)$, связывающих источник и сток сети. В существующей практике решения потоковых задач st-пути выявляются качественным анализом исходной графической модели сети. Правильность результатов при таком подходе зависит от многих субъективных факторов, сопутствующих процессу решения каждой конкретной задачи.

Для снижения фактора субъективности предлагается ввести в процедуру решения элемент формализации, а именно: выявлять пути сети и находить общий поток сети с помощью анализа графической модели дерева путей (см. рис. 1). Для этого все дуги псевдоиерархической структуры сети необходимо трансформировать в ветви псевдоиерархического дерева. Причем присутствие на псевдоиерархической структуре сети нескольких исходящих дуг, инцидентных рассматриваемой вершине сети, интерпретируется на дереве путей как разветвление ветвей, а присутствие нескольких входящих дуг, инцидентных рассматриваемой вершине сети, — как параллельное развитие ветвей дерева.

На построенном дереве путей каждая непрерывная последовательность ветвей, приводящая из источника s к стоку t, является st-путем сети, а все дерево — полным множеством st-путей. Максимальный поток ${}^{\max}F(st)$ на каждом st-пути определяется зависимостями:

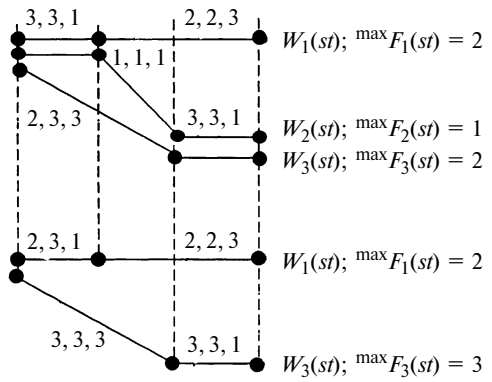
$$ {}^{\max}f(x, y) = l(x, y) \mid \forall (x, y) \in W(st) \wedge {}^{0}f(x, y) = = 0 \ \forall (x, y) \in N; $$

$$ {}^{\max}F(st) = \min\{{}^{\max}f(x, y)\} \ \forall \ (x, y) \in W(st). $$

Заметим, что дерево путей облегчает выявление st-путей сети и определение потоков $F(st)$ на этих путях, что создает необходимые предпосылки для формирования максимального общего потока сети.

Общий поток F^N сети рассматривается в потоковых задачах как совокупность всех одновременно присутствующих в сети путевых st-потоков $F(st)$, причем поток сети может состоять из различных комбинаций путевых потоков. Поэтому в общем случае число возможных вариантов общего потока F^N является комбинаторной характеристикой сети и определяется числом сочетаний. Однако при поиске максимального потока сети число рассматриваемых в задаче вариантов общего потока сети может быть сужено. В данном случае достаточно рассмотреть только те сетевые потоки, которые являются полной совокупностью st-потоков, включающих дуги, инцидентные источнику s сети. Для каждого такого i-го варианта сетевого потока определяется величина общего потока F_i^N сети, как сумма входящих в него j-х st-потоков: $F_i^N = \Sigma_j F(st)_{ij} \ \forall \ j \in J$.

Из множества найденных параметров F_i^N формируется вариационный ряд, анализ которого позволят выявить экземпляры общего потока сети, характеризующиеся максимальной величиной. В общем случае таких



${}^{\max}F^N_1 = {}^{\max}F^N_2 = 5$

$P^N_1 = (3 \cdot 1 + 2 \cdot 3) + (1 \cdot 1) + (2 \cdot 3 + 3 \cdot 1) = 19$

$P^N_2 = (2 \cdot 1 + 2 \cdot 3) + (3 \cdot 3 + 3 \cdot 1) = 20$

Максимальный поток минимальной стоимости — ${}^{\max}F^N_1 \wedge {}^{\min}P^N_1$

Рис. 2. Пример нахождения максимального потока сети минимальной стоимости

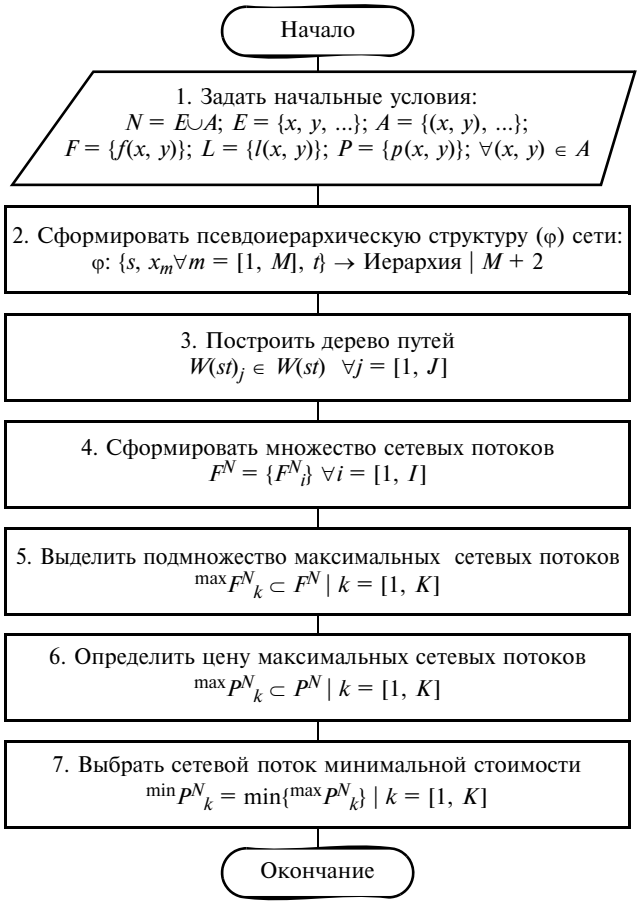


Рис. 3. Алгоритм поиска максимального потока минимальной стоимости

k-х экземпляров ${}^{\max}F^N_k$ может быть несколько (K). Именно эти k-е экземпляры сетевого потока рассматриваются далее при выборе потока минимальной стоимости (рис. 2).

Процедура определения максимального потока минимальной стоимости может быть реализована разными способами. Один из наиболее простых методов сводится к прямому расчету стоимости каждого из найденных вариантов k-го максимального потока и к последующему выбору варианта, обладающего минимальным значением стоимости. При этом стоимость каждого k-го максимального потока P^N_k сети суммируется из стоимостей входящих $q = x$ st-потоков, которые, в свою очередь, складываются из множества произведений величины $f(x, y)_{qr}$ r-х дуговых потоков на цены $p(x, y)_{qr}$ этих потоков.

Произведения $f(x, y)_{qr} \cdot p(x, y)_{qr}$ суммируются по всем дугам каждого q-го st-пути и по всем st-путям рассматриваемого k-го потока сети: $P^N_k = \Sigma_q \Sigma_r f(x, y)_{qr} \times \times p(x, y)_{qr}$.

Дальнейшее сопоставление результатов расчета стоимости всех сетевых максимальных потоков позволяет выбрать искомый максимальный поток, обладающий минимальной стоимостью (см. рис 2).

В заключение следует заметить, что предлагаемый механизм поиска максимального сетевого потока минимальной стоимости обобщается простым линейным алгоритмом (рис. 3), что создает необходимые условия для автоматизации решения рассмотренной здесь максиминной потоковой задачи и обеспечивает определенные перспективы для реализации предлагаемого подхода на базе современных цифровых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ford L. R., Fulkerson D. R.** Flows in networks. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1962.
2. **Edward Minieka.** Optimization Algorithms for Networks and Graphs. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 1978.
3. **Омельченко И. Н., Иванилова А. М., Терентьева З. С.** Практикум по логистике: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
4. **Практикум** по логистике: Учеб. пособие / Под ред. Б. А. Аникина. ИНФРА-М, 2001.
5. **Соколицын С. А.** Применение математических методов в экономике и организации машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1970.
6. **Хазанова Л. Э.** Логистика: методы и модели управления материальными потоками. М.: Изд-во БЭК, 2003.

УДК 311.312.003

В. В. МЕНЬЩИКОВ, канд. техн. наук, Г. В. КОЗЛОВ, д-р физ.-мат. наук,
С. Е. ЕРОШИН (ОАО «Концерн ПВО "Алмаз-Антей"»)

Метод построения рейтинговой системы оценок эффективной деятельности

Выработка управленческих решений в органах государственной власти и в крупных корпоративных компаниях сталкивается с необходимостью оценки эффективности деятельности подведомственных структур. В том случае, когда их деятельность характеризуется рядом разноплановых параметров, данная задача является весьма нетривиальной. Например, рейтинговая система оценок регионов страны строится с учетом более ста параметров, характеризующих экономическую, финансовую, промышленную, социальную, демографическую, культурную, криминальную ситуации.

В случае коммерческих структур ситуация более простая. В странах с развитой рыночной системой критическими параметрами, характеризующими эффективность их деятельности, являются чистая прибыль и стоимость акционерного капитала. В наших условиях при значительной доле теневого товарооборота в экономике данные параметры не дают объективной оценки

эффективности деятельности предприятий, и задача оценки многократно усложняется.

Свои особенности имеет оценка эффективности деятельности предприятий в корпоративных системах оборонно-промышленного комплекса. Наряду с экономическими показателями в расчет должны приниматься также данные, характеризующие результаты их работы по выполнению государственного оборонного заказа — реализации миссии корпоративной системы.

Очевидно, что сравнение между собой разнотипных статистических показателей можно вести только на основе рейтинговых параметрических систем. Известны два принципиально разных подхода к построению системы рейтинговой оценки [1—6]. Первый базируется на экспертных оценках, второй — на статистических параметрах и математических методах их обработки. Схемы их реализации приведены на рис. 1.

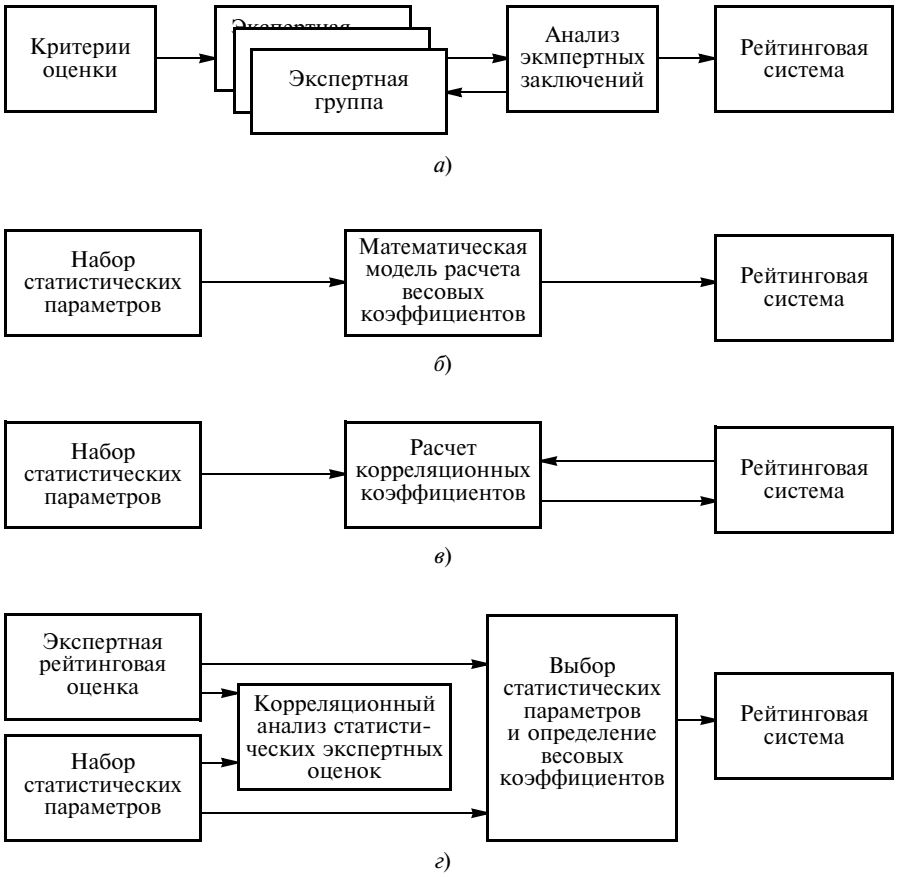


Рис. 1. Схемы формирования рейтинговой системы методом:
а — экспертным; *б* — статистических данных; *в* — итерационным; *г* — обобщенным

Экспертные оценки имеют преимущества при оценке творческой деятельности, где переход к числовым показателям затруднен, а в ряде случаев и вообще невозможен. Повышение объективности таких оценок достигается путем подбора высококвалифицированных экспертных групп, оптимизации критериев оценки, а также использования специальных математических приемов обработки и обобщения результатов экспертизы [7].

Методы, базирующиеся на анализе наборов статистических данных, весьма многочисленны и разнообразны [4—6]. Их центральным моментом является определение весовых коэффициентов, характеризующих вклад отдельных параметров в результирующую рейтинговую оценку. Однозначность выбора далеко не всегда является убедительной, особенно в тех случаях, когда она принимается под влиянием "волевых" решений или политических ориентиров.

Интересные возможности построения системы рейтинговых оценок открывает подход, основанный на синтезе обоих отмеченных подходов [8]. Суть этого метода состоит в анализе корреляционной способности отдельных параметров рейтинговых систем с экспертной оценкой. Таким путем удается выделить набор статистических параметров (ключевых показателей эффективности), наиболее существенно и точно характеризующих эффективность деятельности анализируемых структур, а также рассчитать для них весовые коэффициенты [9, 10].

В данной работе предлагается итерационный метод построения рейтинговой системы оценок на основе статистических параметров и проводится его сравнение с существующими подходами.

Суть метода состоит в следующем. В качестве первого приближения строится рейтинговая система, в которой весовые множители всех используемых статистических параметров одинаковы. Затем рассчитываются коэффициенты корреляции рейтингов по каждому отдельному параметру с рейтинговой системой первого приближения. Во втором приближении рейтинговая система рассчитывается с весовыми множителями параметров, роль которых выполняют полученные коэффициенты корреляции. Затем вновь рассчитываются

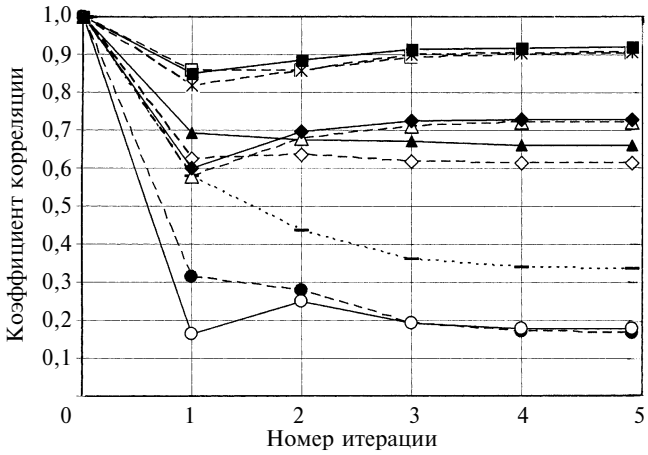


Рис. 2. Динамика значений коэффициентов корреляции

Параметр оценки	Коэффициент корреляции			
	до исключения параметра 9	после исключения параметра 9	до исключения параметра 4	после исключения параметра 4
1. Отношение объема государственного долга к объему доходов бюджета без учета финансовой помощи из федерального бюджета, %	0,33	0,33	0,33	0,32
2. Доля собственных доходов в общем объеме доходов, %	0,9	0,89	0,9	0,9
3. Объем собственных доходов, млн руб.	0,91	0,89	0,91	0,91
4. Отношение дефицита бюджета к доходам бюджета, %	0,16	0,18	—	—
5. Отношение текущих расхожов к суммарным расходам бюджета, %	0,18	0,19	0,18	0,18
6. Отношение задолженности по налогам к общему объему налоговых платежей, %	0,61	0,63	0,61	0,61
7. Доля прибыльных предприятий, %	0,66	0,65	0,66	0,66
8. Среденедушевые денежные доходы, руб/мес	0,72	0,74	0,72	0,72
9. Сальдо прибылей и убытков, млн руб.	—	—	0,92	0,92
10. Инвестиции в основной капитал на душу населения, тыс. руб.	0,73	0,77	0,73	0,73

корреляционные коэффициенты и рейтинговая система следующего приближения, и так до тех пор, пока значения корреляционных коэффициентов не придут к устойчивым величинам.

Продемонстрируем работу этого метода на примере оценки регионов страны. Необходимые для этого данные позаимствуем в работе [11]. Поскольку ни политическая, ни экономическая составляющие результатов данной оценки не входят в нашу задачу, то мы не будем оперировать названиями регионов.

Для оценки относительной кредитоспособности в работе [11] были использованы десять параметров, характеризующих экономическое и финансовое положение 79 регионов. Результаты расчетов коэффициентов корреляции используемых статистических параметров по предлагаемой нами процедуре приведены на рис. 2:

- - —— - - — отношение объема государственного долга к объему доходов бюджета без учета финансовой помощи из федерального бюджета, %;
- - □ - - — доля собственных доходов в общем объеме доходов бюджета, %;
- - ∗ - - — объем собственных доходов, млн руб;
- - ● - - — отношение дефицита бюджета к доходам бюджета, %
—○— — отношение текущих расходов к суммарным расходам бюджета, %;
- - ◇ - - — отношение задолженности по налогам к общему объему налоговых платежей, %;
—▲— — доля прибыльных предприятий, %;
- - Δ - - — среднедушевые денежные доходы, руб/мес;
—■— — сальдо прибылей и убытков, млн руб.;
—◆— — инвестиции в основной капитал на душу населения, тыс. руб.

Полная матрица исходных данных содержит 790 элементов.

Как видно из рис. 2, итерационный процесс выходит на конечный результат уже на пятом шаге.

Для демонстрации устойчивости полученных данных нами был проведен итерационный процесс, в котором было введено "зашумление" начальных весовых коэффициентов параметров на 50 %. Конечные значения коэффициентов корреляции при этом не претерпели никаких изменений, что свидетельствует об их устойчивости к начальным условиям.

Проследим, как изменяются коэффициенты корреляции при изменении набора исходных параметров. В таблице показаны результаты расчетов, выполненных для двух случаев. В первом расчете был исключен параметр с минимальным значением коэффициента корреляции, а во втором — с максимальным. Видно, что, во-первых, изменения корреляционных коэффициентов оказались незначительными, во-вторых, исключение параметра, отвечающего максимальному коэффициенту корреляции, осталось практически незаметным. Это свидетельствует, во-первых, о том, что данный набор параметров является достаточно представительным и взаимосвязанным, а во-вторых, о том, что данный метод позволяет проводить "испытания на совместимость" параметров и отсеивать те из них, которые не уточняют систему рейтинговой оценки внутри данного набора параметров.

Низкий коэффициент корреляции параметра дает основание для анализа его адекватности с точки зрения

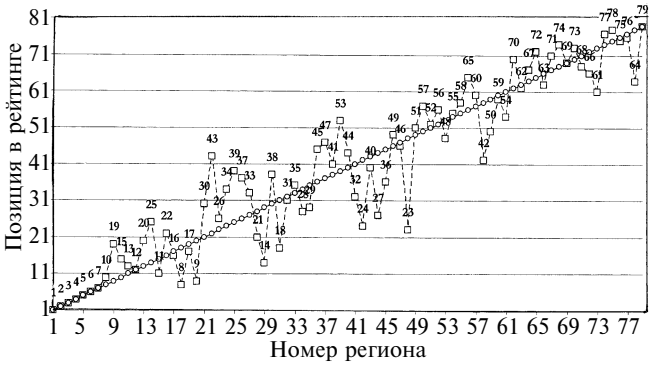


Рис. 3. Рейтинги регионов, рассчитанные без учета разбиения показателей на группы, по данным агентства AK&M (—○—) и полученные итерационным методом (- -□- -)

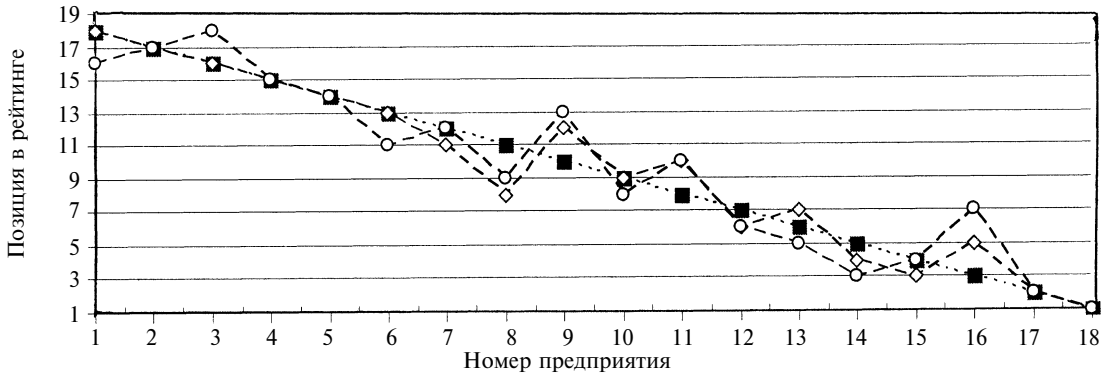


Рис. 4. Рейтинги предприятий, полученные на основе обобщенного (– -○- –) и итерационного (- -◇- -) методов и экспертных оценок (- -■- -)

исходной постановки задачи, а также его надежности. На начальном этапе становления рыночных отношений метод оценки надежности экономических и финансовых показателей имеет самостоятельное значение не только для построения рейтинговых оценок, но и для принятия решений по совершенствованию самих экономических отношений.

Полученная итерационным методом рейтинговая система по относительной кредитоспособности регионов находится в достаточно хорошем соответствии с результатами анализа работы [11] (рис. 3).

В работе [8] нами была построена рейтинговая система оценки дочерних предприятий крупного оборонного концерна, которая базировалась на отмеченном выше обобщенном экспертно-статистическом подходе. На основе исходного набора статистических параметров [8] был проведен расчет рейтинговой системы дочерних предприятий в рамках рассматриваемого итерационного метода.

На рис. 4 приведено сравнение итерационной рейтинговой системы оценок дочерних предприятий с экспертной и обобщенной оценками соответственно. Видно, что результаты, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой, что опять же свидетельствует о высокой работоспособности предлагаемого итерационного подхода.

Подводя итог, отметим, что предлагаемый итерационный метод характеризуется простотой замысла и прозрачностью используемого математического аппарата, он не требует привлечения экспертных или каких-либо других сведений для определения весовых коэффициентов. При достаточном числе исходных статистических данных итерационный метод позволяет оценить "совместимость" каждого из параметров с рассматриваемым набором параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Литвак Б. Г.** Экспертные оценки и принятие решений. М.: ПП "Патент", 1996. 271 с.
2. **Литвак Б. Г.** Экспертные технологии в управлении. М.: Дело, 2004. 398 с.
3. **Хейес-Рот Ф., Уотерман Д., Ленат Д.** Построение экспертных систем. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 438 с.
4. **Оценка** интеллектуальной собственности / Под ред. С. А. Смирнова. М.: Финансы и статистика, 2003. 352 с.
5. **Савицкая Т. В.** Анализ эффективности деятельности предприятий: методические аспекты. М.: Новое знание, 2004. 160 с.
6. **Шеремет А. Д., Сайфулин Р. С.** Методика финансового анализа. М.: ИНФРА-М, 1996. Ч. 1, 2. 172 с.
7. **Орлов А. И.** Эконометрика. Учебник. М.: ЭКЗАМЕН, 2002. 273 с.
8. **Меньщиков В. В., Козлов Г. В., Ерошин С. Е.** Оценка эффективности деятельности предприятий оборонного концерна // Электронная промышленность. 2005. № 3. С. 66—73.
9. **Бугров Д.** Метрика эффективности // Вестник McKinsey. 2003. № 1. С. 3.
10. **Козак Н.** Сбалансированная система оценочных индикаторов как инструмент управления бизнесом // Управление компанией. 2004. № 1. С. 1—2.
11. **Исследование** относительной кредитоспособности субъектов РФ / ЗАО "Рейтинговое агентство AK&M". 2006. 32 с.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Правила подготовки рукописей смотрите в №1 за 2007 г. на третьей странице обложки.

УДК 681.518.54

В. Н. СЫЗРАНЦЕВ, С. Л. ГОЛОФАСТ, доктора технических наук,
П. А. ОБАКШИН (Тюменский государственный нефтегазовый университет),
Т. Р. ЗМЫЗГОВА (Курганский государственный университет)

Особенности фильтрации цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа для оценки поврежденности деталей и конструкций машин

Один из новых подходов к диагностике усталости различных деталей, узлов и конструкций машин базируется на обработке информации, полученной с помощью датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ), которые представляют собой новые средства экспериментального исследования [1, 2].

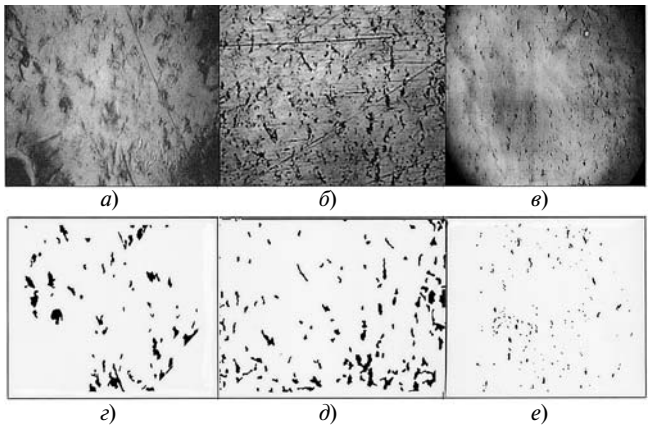
Интенсивное развитие и интеграция информационных и компьютерных технологий в научные исследования стимулирует создание новых, более совершенных и мощных автоматизированных систем, предназначенных для обработки и анализа экспериментальных данных, полученных с помощью ДДИТ. Применение датчиков и последующая компьютерная обработка цифровых изображений их реакции позволяют исследовать процессы накопления усталостных повреждений в сварных образцах и решать широкий спектр задач по исследованию характера изменения напряжений, восстановлению закона распределения и определению эквивалентных напряжений, оценке мест и сроков вероятного разрушения деталей при стендовых и эксплуатационных испытаниях.

Одним из видов внешней реакции датчиков на амплитуду циклических напряжений и число циклов деформирования является изменение состояния поверхности — появление "темных пятен", что является следствием необратимых смещений атомов кристаллической решетки. Наличие корреляции между усталостным разрушением основного металла и величиной максимального насыщения поверхности ДДИТ "темными пятнами" позволяет определять степень усталостного повреждения образцов. Структурные изменения в ДДИТ могут оцениваться разными методами: визуально по эталонным фотографиям, по среднему значению размеров выросших зерен, на основе расчета относительной площади измененной структуры. Анализ методов показал, что последний предпочтителен.

Измерение относительной площади, занимаемой растущими зернами на поверхности ДДИТ, является важной задачей в процессе реализации методик применения датчиков. Предварительный анализ цифровых изображений реакции датчиков позволяет сделать вывод о том, что большинство из них сильно искажено шумами, имеют неравномерные яркость и контрастность (рисунок *а—в*). Данное обстоятельство приводит к разрывам и разрушению присутствующих на изображениях объектов, появлению малоконтрастных и зашумленных участков, маскировке объектов анализа и обусловливает высокие требования к надежности и точности результатов исследований.

Процесс нахождения и выделения объектов на таких изображениях достаточно сложен. Для решения данной задачи целесообразно использовать процедуры предварительной обработки и преобразования их изображений, которые сохраняют их основные структурные свойства, достаточные для последующего анализа и распознавания.

Исследования многих известных алгоритмов фильтрации позволили сделать вывод о том, что использование любого из них в чистом виде невозможно. Одним из значительных недостатков существующих методов является то, что в большинстве своем они обеспечивают формирование слабоконтрастных изображений реакции ДДИТ, часто приводят к размыванию границ объ-



Изображения реакции ДДИТ:
а—в — до фильтрации (цифровые); *г—е* — после фильтрации (компьютерные)

ектов на исследуемых изображениях, а также к стиранию отдельных значимых элементов. Это объясняется тем, что каждый из входных импульсов стандартного фильтра обычно дает отклик в виде импульсной характеристики фильтра, а их совокупность способствует распространению помехи на всю площадь изображения. Дли устранения нежелательных последствий необходим постоянный контроль результатов фильтрации. Именно этот факт послужил причиной разработки специального алгоритма фильтрации изображений реакции ДДИТ, который получил название маркировочного фильтра и позволил добиться оптимального качества фильтрации.

Маркировочный фильтр относится к числу комбинированных фильтров, в которых к обрабатываемому изображению последовательно применяются несколько алгоритмов фильтрации. Как подтвердили экспериментальные исследования, предварительное преобразование изображения на основе использования данного фильтра является наиболее эффективным средством начальной обработки изображений реакции датчиков, поскольку он обладает существенно более выраженной способностью к сглаживанию имеющегося шума. Его действие основано на совместном применении энтропийного фильтра, последующего бинарного квантования изображения по порогу, фильтрации случайных отклонений и сегментации полученного изображения на основе маркировки его компонент с целью окончательного удаления оставшихся искажений и помех. Следует отметить, что характерной особенностью используемых преобразований является то, что они не связаны с изменением общей геометрии изображения и поэтому могут быть выполнены в рамках локальных операций.

Компьютерная реализация метода применительно к изображениям, представленным на рисунке, *а—в*, показана на рисунке, *г—е*.

Программа, основанная на использовании алгоритма маркировочной фильтрации, реализована в среде программирования Visual C++. Анализ преобразованного изображения свидетельствует, что на нем отсутствуют фрагменты с низкой информационной ценностью, происходит общее улучшение изображения, в том числе улучшается контраст, снижается уровень высокочастотных помех, частично компенсируется неравномерность основного фона. Следовательно, можно сделать вывод, что предлагаемый вариант фильтрации позволяет найти разумный компромисс в известном противоречии между степенью фильтрации шума и сохранением контрастных деталей обрабатываемого изображения.

В заключение отметим, что разработанный комплекс имеет большие потенциальные возможности для использования при препарировании и автоматическом распознавании изображений реакции ДДИТ, в частности, для точной идентификации таких важных признаков объектов, как форма, размер, ориентация, особенности контура и др., что важно при решении многих задач технической диагностики и контроля деталей и конструкций машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л.** Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. Новосибирск: Наука, 2004. 206 с.

2. **Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л., Сызранцева К. В.** Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. Новосибирск: Наука, 2004. 188 с.

Выставка "Мир инструмента—2007"

С 27 по 30 марта 2007 г. на территории Культурно-выставочного центра "Сокольники" проходила седьмая Международная специализированная выставка инструмента для различных отраслей промышленности: инструмент для холодной обработки давлением; смазочно-охлаждающие жидкости; специальный инструмент и сварочное оборудование.

В статье приведено краткое описание некоторых экспонатов и предложений компаний-разработчиков.

Савеловский машиностроительный завод (г. Кимры Тверской обл.) предложил потребителям свою продукцию.

Токарный станок ТПК-125А1-1 для патронной и центровой обработки с высокой точностью и большим числом проходов малогабаритных деталей сложного профиля из конструкционных сталей и сплавов. На станке можно проводить все виды токарной обработки и нарезание резьбы резцом. Наличие револьверной головки позволяет значительно расширить технологические возможности станка, повысить производительность и качество обрабатываемых деталей. Механизм захвата позволяет обрабатывать детали из пруткового материала диаметром до 25 мм и длиной до 800 мм. На суппорте станка смонтированы высокоточные линейные направляющие, пневмопатрон, высокоточные шарико-винтовые пары с арочным профилем. Станок оснащен агрегатом автоматизированной подачи прутка (вместимостью 25 шт., диаметром 25 мм и длиной до 1000 мм) и механизмом приема готовой детали. Станок также оснащен устройством для лазерно-плазменного полирования поверхности стали после механической токарной обработки. В качестве инструмента используется твердотельный технологический лазер. Наибольшие: диаметр устанавливаемой заготовки — 125 мм; длина обрабатываемой поверхности — 180 мм; пределы рабочих подач суппорта 1...600 мм/мин со скоростью 8000 мм/мин; частота вращения шпинделя 50...400 мин$^{-1}$. На станке можно установить шесть инст-

рументов. Шероховатость поверхности обрабатываемых деталей: стальных Ra = 1,25 мкм; цветных сплавов (алмазным резцом) Ra = 0,32 мкм. Суммарная мощность электродвигателей 9,04 кВт. Габаритные размеры станка 1680×1040×1630 мм, масса 1,86 т.

Специализированный многофункциональный фрезерный станок УФ-320 для широкого использования в условиях индивидуального и серийного производства. На станке возможна обработка плоских и фасонных поверхностей цилиндрическими, торцевыми и концевыми фрезами. Технические показатели станка обеспечивают производительную обработку стали, чугуна, цветных металлов с применением быстрорежущего и твердосплавного инструмента. Станок оснащен вертикальным поворотным шпинделем, позволяющим использовать горизонтальную фрезерную насадку и горизонтальный шпиндель, что значительно расширяет технологические возможности станка. Смазка станка осуществляется от централизованных систем. Рабочая поверхность стола 1250×320 мм. Наибольшее перемещение вертикального шпинделя 80 мм. Пределы частот вращения шпинделя: вертикального 45...2000 мин$^{-1}$; горизонтального 20...2000 мин$^{-1}$. Число ступеней рабочих подач стола 22. Скорость перемещения стола: в продольном и поперечном направлениях — 4000 мм/мин; в вертикальном направлении — 1333 мм/мин. Суммарная мощность электродвигателей 10,33 кВт. Габаритные размеры станка 2275×2240×2015 мм, масса 3,25 т.

Многоцелевой пятикоординатный станок CAM5-850C с ЧПУ комплексной механической обработки отверстий, плоскостей и криволинейных поверхностей в корпусных деталях, для формообразования которых требуется до пяти управляемых осей. Станок используется для обработки конструкционных, жаропрочных, легированных сталей, чугуна, титановых и алюминиевых сплавов. Наличие двух поворотных столов с высокой точностью позиционирования позволяет получать детали повышенной точности с высоким качеством поверхностей при большой производительности. Наибольшие габаритные размеры обрабатываемой заготовки 500×500×400 мм. Повороты столов: вертикального — 360°, горизонтального — 90°. Мощность привода главного движения 22 кВт. Число инструментов в магазине 39. Точность позиционирования по координатам: X (стол) — 0,025 мм, Y (салазки) — 0,025 мм, Z (вертикальная) — 0,0254 мм. Габаритные размеры станка 5290×5180×4500 мм, масса 25 т.

Продольно-фрезерный высокоскоростной пятикоординатный станок ВФ-5ВС с ЧПУ, созданный на базе продольно-фрезерного станка ВФ-5Н для высокоскоростной обработки по заданной программе крупногабаритных длинномерных деталей со сложными поверхностями, изготовленных из алюминиевых сплавов. На станке можно осуществлять фрезерование плоскостей, пазов, карманов, уступов, криволинейных контуров, а также сверление, зенкерование, развертывание, растачивание отверстий, нарезание резьбы метчиком. Отличительной особенностью станка является применение двухосевой поворотной головки с электрошпинделем, позволяющей вести обработку одновременно по пяти координатам. Наличие в составе приводов подач высокодинамичных серводвигателей позволяет реализовать на станке высокоскоростную обработку с высокими качеством поверхностей, точностью и производительностью. Размеры рабочего стола 7000×2500 мм. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки 15 т. Максимальная номинальная мощность приводов электрошпинделей 35 кВт. Габаритные размеры станка 19000×6500×6000 мм, масса 105 т.

Комбинированные ножницы мод. НК-208М для расширения узких проемов, подъема, перекусывания, удержания в неподвижном состоянии объектов, перекусывания и резки стальных прутков, уголков и других профилей, пережатия труб. Диаметр перекусываемого прутка из арматурной стали 25 мм; толщина разрезаемого стального листа 10 мм; максимальный размер разрезаемого уголка 50×50 мм. Габаритные размеры ножниц 560×315×177 мм, раскрытие челюстей 240 мм.

Ручной двухступенчатый насос мод. РН-2080М для подачи рабочей жидкости в гидравлический инструмент. Насос приводится в действие рукой оператора и может эксплуатироваться во взрывоопасном помещении. Рабочее давление — 80 МПа, габаритные размеры — 664×200×180 мм, масса — 12 кг.

Малогабаритный пресс мод. МПС-300 для испытания на прочность сварных стыков методом статического изгиба образцов до их разрушения с автоматической регистрацией величин разрушающего усилия и деформации. Максимальные: рабочее усилие пресса — 3000 кН; рабочее давление — 80 МПа; длина испытуемого образца — 1200 мм. Габаритные размеры: пресса 2000×560×1585 мм, гидропривода 640×490×1100 мм, масса 1,58 т.

Компания 3М (г. Москва) демонстрировала на выставке зарубежные *инструменты для очистки вручную поверхностей* с использованием листов Scotch-Brite^{TM}, имеющих различные зернистость и жесткость основы. Листы представляют собой нетканное полотно, равномерно насыщенное абразивом по всему объему основы. Лист на жесткой основе, насыщенной абразивом средней зернистости, обеспечивает быструю очистку и полное удаление загрязнений (ржавчины, окалины и т. п.) не только с ровной поверхности, но и из труднодоступных участков. Лист на мягкой основе, насыщенной абразивом очень тонкой зернистости, обеспечивает качественную доводку поверхности и удаление рисок от предыдущей обработки поверхности листом более грубой зернистости. Приведем краткое описание некоторых технологий и оборудования для механической очистки:

для механической очистки проходных отверстий используют абразивные круги — звездочки из материала Scotch-Brite^{TM} — различных диаметров, зернистости и жесткости основы. За счет центробежных сил лепестки звездочки плотно поджимаются к стенкам обрабатываемого отверстия, что обеспечивает полную очистку за один—два прохода. Обработка звездочками из Scotch-Brite^{TM} не искажает точные размеры поверхностей;

для эффективного удаления ржавчины, краски и старых покрытий, подготовки поверхности к сварке и очистке зоны сварного шва используют зачистные круги Scotch-Brite^{TM} Clean & Strip. Усиленный материал основы круга в сочетании с минералом очень грубой зернистости позволяют удалять даже трудноудалимые застарелые загрязнения и покрытия. Открытая трехмерная структура препятствует засаливанию абразива, обеспечивая постоянное качество резания, и позволяет обрабатывать детали сложной формы, не изменяя геометрии обрабатываемой поверхности;

для механической очистки поверхностей сложной формы (резьбы, шпоночные пазы, уплотнительные канавки и т. п.) используют круги Scotch-Brite^{TM} различных размеров. Круги имеют мягкую самозаправляющуюся основу. Круг заправляется под обрабатываемый профиль за один—два прохода, обеспечивает полную очистку всей детали, не влияя на контактные области. Упругая структура абразивного материала обеспечивает минимальный съем металла и полностью исключает риск искажения точной формы обрабатываемой детали.

"Современная машиностроительная компания" (г. Москва) представила на выставке ленточные полотна, изготовленные в Германии, для предприятий машиностроения.

Универсальное полотно PROFIM42 с зубьями из быстрорежущей инструментальной стали, содержащей 8 % Co и 10 % Mo. Твердость зуба полотна ≈68 *HR*C, что позволяет резать конструкционные и среднелегированные стали с твердостью до 45 *HRC*. Размеры пилы 67×1,6 мм.

Твердосплавные полотна TCT с твердостью зубьев ≈1600 *HV*. Полотна предназначены для резки заготовок сплошного сечения с твердостью до 62 *HRC*. Полотна также могут использоваться для резки силуминов, алюминиевых бронз, серого чугуна, титановых сплавов, сплавов на никелевой основе. Благодаря высокой твердости зубьев и высокой прочности на растяжение материала подложки достигается значительное увеличение параметров режимов резания и, как следствие, значительное сокращение времени распила.

Разработчики рекомендуют для продления срока эксплуатации пил работать только при малой вибрации и начинать резание в щадящем режиме с постепенным увеличением нагрузки на зуб.

Фирма JET (США) демонстрировала инструмент для деревообработки.

Комбинированный деревообрабатывающий станок мод. PKM-300. с двигателем мощностью 2,1 кВт. Он оснащен отшлифованными чугунными регулируемыми столами для строгания. Отдельно вынесенный узел для сверления также имеет чугунный стол с прижимом и ручку для перемещения стола к сверлильному инструменту. Частота вращения строгального вала и пильного диска до 4200 мин$^{-1}$. За счет этого улучшилось качество поверхности детали после строгания и распиливания. Питающее напряжение станка 230 В, мощность 2,1 кВт. Максимальные: глубина пропила — 70 мм, ширина распила — 300 мм. Станок оснащен тремя строгальными ножами с размерами 210×30×3 мм. Максимальные: глубина строгания-3 мм, ширина строгания — 200 мм, диаметр сверления — 13 мм, глубина сверления — 90 мм. Габаритные размеры станка 1070×1150×530 мм, масса 90 кг.

Станочные тиски DPV/CI для сверления при слесарных работах. Они изготовлены из литейного чугуна и имеют большие установочные пазы для удобства регулировки на рабочем столе станка. Неподвижная губка имеет горизонтальный и вертикальный V-образные пазы для крепления цилиндрических заготовок. Обе губки (ширина до 100 мм при расходе губок 80 мм) имеют уступы для зажима плоских и небольших по высоте деталей.

Фирма ANT (г. Москва) представила ручные гидравлические тележки, изготовленные за рубежом.

Ручная гидравлическая тележка мод. CN грузоподъемностью 3,5 т с масляным насосом, изготовленным точным литьем. Отдельный бак, содержащий масло, обеспечивает надежную герметичность. Насос с полностью воздухонепроницаемой гидравлической системой надежно защищен от проникновения загрязнений и влажности. Угол поворота тележки 210°, что увеличивает ее маневренность. Она оснащена нейлоновыми колесами. Максимальная высота подъема вил с грузом 195 мм, их длина 1220 мм. Масса тележки 90 кг.

Ручная гидравлическая тележка мод. JF 1000 предназначена для поднятия груза на высоту 800 мм. Она может использоваться в качестве тележки или подъемного стола при погрузочно-разгрузочных работах. Телескопический домкрат обеспечивает устойчивость конструкции и надежную работу насоса. Поддерживающие лапы делают тележку неподвижной во время поднятия вил и обеспечивают безопасность работы оператора. При поднятии груза до 1 т скорость автоматически снижается, предотвращая возможность повреждения груза. Длина вил 1150 мм, ширина до 685 мм, масса тележки 105 кг.

Ручная гидравлическая тележка мод. BF и с весами совмещает две функции — поднятие и взвешивание груза. Масса груза высвечивается на жидкокристаллическом дисплее. Грузоподъемность тележки 2 т, максимальная высота подъема груза 200 мм, длина вил 1150 мм, масса тележки 110 кг.

ООО "ИМАГ" (г. Москва) предложило приборы и инструмент зарубежного производства.

Мультиинтерфейсный тестер D2071 для поиска неисправностей на цифровых абонентских линиях DSL. Прибор позволяет тестировать цифровые системы передачи стандартов ShDSL, ADSL и ISDN. Под каждую технологию разработан соответствующий модуль, подсоединенный к базовому блоку D2071 через специальный разъем. Каждый сменный модуль содержит только те тесты, которые относятся к определенной технологии. Программное обеспечение тестера PC108 for Windows проводит анализ данных и управляет прибором дистанционно. Сочетание таких качеств, как небольшая масса, высокая технологичность измерений, всепогодное исполнение и возможность оперативной смены модулей, выгодно отличает прибор от аналогичного оборудования. Базовый блок выполнен в антиударном корпусе. Жидкокристаллический дисплей имеет широкие графические возможности, хорошо продуманную систему меню. Результаты измерений можно распечатывать, подключив к прибору принтер.

Инструмент PTX для монтажа (демонтажа) провода диаметром 0,25...1 мм. Направление вращения инструмента (реверс) изменяется переключателем, размещенным на тыльной стороне пистолета, что предотвращает случайное переключение. Конструкция пистолета хорошо сбалансирована. Он оснащен мощным редуктором планетарного типа. Питание инструмента от сети переменного тока напряжением 230 В или от аккумулятора напряжением 3,6 В.

Выставка дала возможность специалистам выбрать лучшее, что предлагали российские и зарубежные производители. В рамках выставки была организована широкая научно-деловая программа.

А. Н. Иванов, чл.-корр. АПК

С 12 по 15 марта 2007 г. на территории выставочного комплекса ЗАО "Экспоцентр" проходила специализированная выставка под таким названием. Организаторы выставки: ЗАО ПИК "МАКСИМА", Российский союз химиков и Торгово-промышленная палата РФ при содействии ЗАО "Экспоцентр". На выставке был представлен широкий спектр лакокрасочной продукции: масляные, акриловые, водно-дисперсионные, акриловые лакокрасочные материалы (ЛКМ); порошковые материалы и покрытия; сырье для разных видов ЛКМ; пигменты, растворители, наполнители, пленкообразователи, стабилизаторы, добавки; оборудование для производства и нанесения ЛКМ; тара и упаковка, а также новые технологии и научные разработки.

В статье приведено краткое описание некоторых экспонатов, демонстрировавшихся на выставке.

Лакокрасочный завод КРОНОС СПб (г. Санкт-Петербург) демонстрировал на выставке различные эмали, грунтовки и антикоррозионные покрытия.

Алкидная быстросохнущая матовая эмаль "КРОНОС-СПРИНТ" предназначена для окраски изделий из черных металлов в станкостроении, металлоконструкций, сельскохозяйственной техники, а также деревянных и бетонных изделий. Поверхность под окраску готовится путем абразивно-струйной очистки. Эмаль устойчива к изменениям температуры от −50 до 60 °С при толщине пленки 18...25 мкм. Расход эмали на однослойное покрытие — 45...180 г/м^2.

Антикоррозионный гидроизоляционный материал "ТЕРМОКРОН-Авто" на каучуково-смоляной основе применяется для защиты от коррозии и действия абразива, изнашивания днищ, колес и т. п. Подготовка поверхности производится абразивно-струйной или механической очисткой. Антикоррозионный материал устойчив к изменению температуры от −60 до 90 °С. Рекомендуемая толщина пленки: сухой — 300...400 мкм, мокрой — 600...800 мкм.

Грунтовка—преобразователь ржавчины — "КРОНОС" (водоразбавляемая) представляет собой суспензию пигментов и наполнителей в водной дисперсии синтетического полимера с добавлением различных вспомогательных веществ. Грунтовка применяется для антикоррозионной защиты чистых или с остатками окалины и плотнодержащейся ржавчины металлических поверхностей в качестве самостоятельного покрытия, а также для грунтования этих поверхностей с последующим нанесением различных лакокрасочных материалов. Грунтовка устойчива к изменению температуры от −50 до 60 °С при однослойном покрытии толщиной 15...20 мкм. Расход на однослойное покрытие 90...120 г/м^2.

Антикоррозионная противошумная мастика "ДЕМПФИ" представляет раствор твердых нефтепродуктов, модифицированный добавками, наполнителями и ингибиторами коррозии. Мастика рекомендована для защиты от коррозии внутренних поверхностей при капитальном ремонте. Перед нанесением мастики ржавую поверхность очищают от отслаивающихся продуктов коррозии. Температурные условия нанесения: +10...+35 °С. Расход на однослойное покрытие — 1,2...1,4 кг/м^2. Толщина однослойного высушенного покрытия 600 мкм.

Антикоррозионная грунт-краска "ПИГМОКРОН" представляет суспензию пигментов и наполнителей в пентафталевом лаке с добавлением сиккатива, растворителей, реологических добавок. Грунт-краска применяется для долговременной защиты от атмосферной коррозии изделий из металлов, а также для окраски бетонных и деревянных поверхностей. Грунт-краска устойчива к изменению температуры от −50 до 60 °С. Толщина однослойного покрытия 20...25 мкм. Расход на однослойное покрытие 60...100 г/м^2 (краска наносится при температуре 10...35 °С).

Синтетическая эмаль "АЛЮМИК" представляет суспензию пигментов и наполнителей в алкидном лаке с добавлением сиккатива, растворителей, реологических и антимиграционных добавок. Эмаль применяется в станкостроении для защиты от коррозии изделий из черных металлов, металлоконструкций и т. п. Перед нанесением эмали необходимо произвести абразивно-струйную очистку поверхности. Эмаль устойчива к изменению температуры от −50...60 °С. Она наносится кистью, валиком, краскораспылителем или методом струйного облива в электрическом поле, разбавляется уайт-спиритом. Расход эмали на однослойное покрытие до 150 г/м^2.

Научно-техническая компания "КОРСАР" (г. Санкт-Петербург) предложила потребителям оборудование для подготовки поверхности перед окраской:

установку струйной подготовки поверхности для удаления с поверхности изделий защитных и технологических масел, загрязнений, а также создания на поверхности изделий неорганического конверсионного слоя с целью увеличения коррозионной стойкости покрытия. Технологический процесс выбирается, исходя из материала и условий эксплуатации изделий, а также требований к стойкости покрытия. Все проточные части туннеля и ванны изготовлены из коррозионно-стойкой стали. Температура нагреваемых ванн поддерживается автоматически. Масло с поверхности растворов собирается автоматически. Насосы защищены от "сухой" работы. Состояние системы во время эксплуатации контролируется с центрального пульта;

установку ультразвуковой очистки для удаления механических загрязнений, металлической пыли, стружки, защитных эмалей, нагаров, флюсов, удаления жировых загрязнений, масел, полировочных и притирочных паст (обезжиривание), а также продуктов коррозии, в том числе окислов, ржавчины и окалины (травление). Установка состоит из ультразвукового генератора и преобразователя. Очистка происходит под воздействием на отмываемую поверхность ударных волн, порождаемых кавитацией, возникающей при прохождении мощного ультразвука через моющую среду. Основные преимущества ультразвуковой очистки заключаются в ее высокой производительности при отсутствии затрат физического труда, возможности замены огнеопасных органических растворителей водными растворами щелочей, солей в безопасных концентрациях с добавлением различных поверхностно-активных веществ. Применение ультразвука наиболее целесообразно при финишной очистке и при очистке сложнопрофильных и мелких деталей.

ЗАО "Промкомплект" (г. Санкт-Петербург) демонстрировало приборы для определения качества окраски, разработанные за рубежом.

Прибор NOVO-Gloss LITE 20 для измерения блеска покрытий полированных металлов и пластиков. Особенностью прибора является его автоматическая или ручная калибровка и возможность передачи данных на ПК для анализа с использованием программного обеспечения NOVO-Soft или MS Excel.

Электронный прибор QuaNix 4500 для измерения толщины таких покрытий, как лак, краска, пластик, эмаль, хром, медь, цинк и т. п., на ферромагнитных (Fe) и неферромагнитных (NFe) подложках. Особенность прибора — использование электромагнитного и вихревого принципов измерения толщины покрытий с применением одного датчика без кабеля и управление от одной кнопки.

Прибор QuaNix 8500 для неразрушающего контроля толщины покрытий. Меню прибора разработано для постоянного использования, как в мобильном телефоне. В меню предусмотрен выбор языка (в том числе русского). Язык можно ввести в память прибора самостоятельно через ПК благодаря программному обеспечению QuaNix Software. Интерфейс, расположенный в корпусе прибора, позволяет использовать различные типы цифровых тест-наконечников (Fe, NFe, Fe/Fe), подключая их непосредственно к корпусу прибора или через специальный кабель — адаптор. Программное обеспечение самостоятельно распознает все активные тест-наконечники (при использовании нескольких приборов), действующие в диапазоне беспроводного интерфейса. Показания выводятся на монитор ПК для каждого тест-наконечника индивидуально. Все результаты измерений могут быть сведены в таблицу.

Датчик Right Angle Probe с преобразователем на конце, позволяющий производить измерения в труднодоступных местах. Датчик измеряет толщину на магнитных или немагнитных металлах. Диапазон измерений 0...2000 мкм.

Прибор Grant OMK610 для измерения и регистрации температуры воздуха и изделий в разных точках рабочего объема термокамеры. В память прибора записывается в цифровом виде аналоговый сигнал с шести термодатчиков, закрепленных на из-

делии и подключенных к прибору. По окончании измерений прибор подключается к компьютеру и в течение нескольких минут данные обрабатываются, анализируются, а вся информация распечатывается.

АО "ПОЛИТОН" (г. Казань) демонстрировало оригинальный распылитель "Метеор В-1S" для окраски мелких деталей, а также для работ с частой сменой красок. Качество напыления обеспечивается электронной схемой распылителя. Распылитель оснащен легкосъемными насадками, с помощью которых можно менять размер и форму факела распыла. Благодаря этому можно окрашивать детали разной формы и труднодоступные участки конструкций. Конструкция распылителя позволяет за несколько секунд подготовить его к смене краски. Встроенный бункер позволяет окрашивать до 2,5 $м^2$ поверхности за одну зарядку. Емкость бункера — 0,4 л. Питающее напряжение распылителя 220 В, потребляемая мощность 25 Вт. Габаритные размеры пистолета-распылителя 370 × 230 × 65 мм, масса 0,4 кг.

ЗАО "Блестящая линия" (Москва) представило на выставке системы напыления и блоки управления при окраске:

систему напыления CORONA-940 для нанесения порошка, состоящую из ручного или автоматического пистолета и пульта управления;

блок управления APS-940, работающий с пистолетами-распылителями системы CORONA или TR180 в ручном или автоматическом режимах. В зависимости от вида окрашиваемой детали оператором могут быть заданы разные характеристики и электрические параметры. Это позволяет получать оптимальные условия напыления. Блок управления может использоваться в автоматических технологических линиях с манипуляторами.

ОАО "Жуковский машиностроительный завод" (г. Жуковск Московской обл.) предложило потребителям *линию по производству евробанок,* разработанную во Франции. Емкость банок 10...25 л. Производительность линии 40 банок/мин. Каждая технологическая операция контролируется электронными приборами, а на завершающем этапе специальный тестер проверяет изделие на герметичность. Производство евробанок экологически чистое. В технологическом процессе не используется вода, что не приводит к загрязнению водоемов. Пары растворителя, образующиеся в процессе сушки лаков и красок, сгорают в специальных дожигателях при температуре ≈ 700 °С. В результате выбрасываемый в атмосферу воздух соответствует санитарно-гигиеническим нормам. Банки изготовляются из белой жести и имеют один продольный шов, выполненный электрической контактной сваркой. В конструкции евробанки предусмотрено ребро жесткости для удобства транспортировки пустой тары.

Научно-производственное предприятие "ДИСПОД" (г. Долгопрудный Московской обл.) — один из основных отечественных разработчиков и производителей диспергирующего оборудования для производства лакокрасочных и других высокодисперсных материалов, предложило потребителям свои разработки.

Горизонтальная бисерная мельница мод. МШПМ-1/0, 0,05 предназначена для диспергирования пигментов, красителей и других материалов в жидких средах (лаки, органические растворители, олифа, вода и т. п.). Рабочий процесс помола осуществляется в контейнере. Исходный продукт под действием насоса, пройдя через штуцер комбинированного блока с торцевым уплотнением, поступает в контейнер мельницы. Вращением вала рабочая смесь приводится в движение. В результате исходный продукт измельчается. Жидкая фаза с измельченным веществом через щелевые пальцы-патроны и расширитель выводится из сосуда. Частично переработанный продукт может отводиться на рециркуляцию через специальный штуцер. Мельница применяется в лакокрасочной, анилинокрасочной, полиграфической и других отраслях промышленности. Производительность мельницы по пигментной пасте до 1000 кг/ч, мощность приводов 38 кВт. Ее габаритные размеры 2066 × 1000 × 1520 мм, масса 1 т.

Смеситель-диспергатор мод. СПЕМП-1/0,8 предназначен для смешивания и диспергирования пигментов, красителей и других материалов средней твердости в жидкой среде. Смеситель снабжен двумя мешалками: тихоходной рамной и быстроходной зубчатой. Это позволяет переработать тиксотропные и вязкие материалы, улучшить качество диспергирования, повысить производительность, улучшить теплообмен. Зубчато-сопловая мешалка специальной конструкции позволяет производить высококачественные продукты без использования дополнительных внешних диспергирующих устройств. Мешалка диссольвера может позиционироваться на любой высоте в емкости. Производительность диспергатора до 1,2 т/ч. Общая мощность смесителя 37 кВт. Частота вращения мешалки до 46 $мин^{-1}$. Габаритные размеры смесителя 2250 × 1170 × 2140 мм, масса 1,5 т.

ЗАО "КОНСТАНТА" (г. Санкт-Петербург) демонстрировало на выставке толщиномеры, твердомеры, приборы для испытания на изгиб, удар, растяжение и т. п.

Многофункциональный толщиномер "КОНСТАНТА-К-5" предназначен для контроля толщины лакокрасочных, эмалевых и других диэлектрических покрытий на стальных деталях, шероховатости поверхности после песко- и дробеструйной обработки, влажности и температуры воздуха при окрасочных работах. Работа прибора основана на использовании комбинации импульсного индукционного, вихретокового параметрического и фазового методов получения первичной информации. Работает толщиномер при температуре от −10 до 40 °С. Питание осуществляется от аккумулятора НИКА или элемента КОРУНД. Габаритные размеры толщиномера 150 × 80 × 30 мм, масса 0,18 кг.

Электроискровой дефектоскоп "КОРОНА-1" предназначен для контроля нарушений сплошности защитных покрытий металлических изделий (трещин, пористости, недопустимых утонений и др.) путем подачи импульсного высоковольтного напряжения и фиксацией электрического пробоя. Дефектоскоп отличается высокой безопасностью работы и большим набором сменных электродов для контроля изделий различного назначения. Диапазон регулировки напряжения на электроде 2...15 кВ. Толщина контролируемых покрытий до 4 мм. Скорость перемещения электрода до 0,25 м/с. Питание дефектоскопа осуществляется от встроенного аккумулятора, время непрерывной работы 6 ч. Его габаритные размеры 200 × 140 × 75 мм. Масса: блока контроля с аккумулятором — 2 кг, высоковольтного трансформатора-держателя — 1,3 кг.

Прибор "КОНСТАНТА-КП" предназначен для определения прочности защитных покрытий на трубах и плоских поверхностях при ударе. Ударное приспособление устанавливается на трубу в точках проведения испытания с помощью винтов-ножек. Груз массой 3 кг поднимается на требуемую высоту и сбрасывается на поверхность защитного покрытия. Сплошность покрытия в месте удара контролируется дефектоскопом.

Электролитический дефектоскоп "КОНСТАНТА ЭД2-1" предназначен для контроля пористости, непрокрасов и других нарушений сплошности защитных диэлектрических покрытий металлических изделий. Контроль осуществляется путем приложения к покрытию низковольтного напряжения через губку, смоченную жидким электролитом с высокими проникающими свойствами. Размер контактной поверхности губки-электрода до 30 × 80 мм, контрольное напряжение 9 В, толщина контролируемых покрытий до 300 мкм при скорости перемещения электрода не более 0,25 м/с. Габаритные размеры электронного блока дефектоскопа 150 × 80 × 30 мм.

Твердомер "КОНСТАНТА-ТК" предназначен для определения твердости покрытий при царапании их графитовым стержнем (грифелем карандаша). Карандаш с варьируемой твердостью перемещается по покрытию с фиксированным нажатием 7,6 Н под углом 45° к поверхности. Твердость карандаша, способного повредить поверхность, принимают за измеренное значение твердости покрытия. Карандаш закрепляют в тележке, которую устанавливают в начале испытуемой пластины, и продвигают вперед на 6...12 мм. Поворачивают карандаш на 90°, возвращают тележку в начальное положение, продвигают ее в ту же сторону, что и при первом испытании, на 6...12 мм. Таким образом определяют наличие царапин и вмятин на покрытии. При их отсутствии испытание повторяют с более твердым карандашом. Твердость применяемых карандашей 5В...5Н. Габаритные размеры тележки 140 × 140 × 140 мм, масса 0,9 кг.

Автоматизированная система для измерения в автоматическом режиме толщины рулонных материалов в составе машин, производящих изотопные системы измерения плотности. Отличительными особенностями системы являются отсутствие источников радиоактивного излучения; возможность измерения толщины во всех точках полотна относительно валков машин; статистическая обработка и документирование результатов. Информация отображается на жидкокристаллическом дисплее. Диапазон измерения толщины 0...5 мм при погрешности ± 0,01 мм и времени измерения ⩽ 0,1 с. Режим измерения непрерывный. Система оснащена аварийной сигнализацией, срабатывающей при выходе измеряемого значения за допуск.

К 85-летию получения гражданином России Алексеем Несторовичем Шелестом Главного патента Швейцарии № 95277 на изобретение газовой турбины, которая сегодня применяется повсеместно: на самолетах и вертолетах, судах морского и речного флота, для перекачивания нефти и газа по магистральным трубопроводам и на электрических станциях разного назначения.

УДК 621.44 + 621.438

П. А. ШЕЛЕСТ, канд. техн. наук

От паровой машины Д. Уатта до газовой турбины А. Н. Шелеста

Два великих изобретения XVII и XVIII веков создали основу для развития в мире промышленного производства: изобретение Денисом Папеном в 1681 г. и изобретение Джеймсом Уаттом в 1783 г. паровой машины двойного действия. Путь к этому гениальному открытию был долгим. Джеймс Уатт родился 19 января 1736 г. в небольшом городке Шотландии. С ранних лет мальчик работал на угольных шахтах Англии, где впервые познакомился с паровой машиной Т. Ньюкомена, которая предназначалась для откачивания воды из шахт и была еще очень несовершенной. Поршень этой машины перемещался возвратно-поступательно под действием давления пара и приводил в движение поршень водяного насоса. В возрасте 21 года Джеймс Уатт поступил работать механиком в Университет города Глазго, где занимался ремонтом и усовершенствованием точных приборов. Тогда же он с высокой для того времени точностью исследовал на модели свойства водяного пара.

В 1783 г. Д. Уатт исследует модель двигателя Т. Ньюкомена и приходит к важному выводу о том, что в цилиндре парового двигателя можно произвести расширение пара, что позволит сократить расход топлива. Одновременно с этим он обратил внимание на то, что горячий пар при соприкосновении с холодными стенками двигателя конденсируется в воду, а это приводит к поломкам паровой машины. Для предотвращения конденсации пара Д. Уатт предложил обогревать цилиндр двигателя с помощью специальной рубашки. Тогда же он заметил, что при конденсации пара давление падает, что натолкнуло его на мысль использовать в паровой машине специальный конденсатор для расширения пара до более низких давлений, чем атмосферное. На все эти новшества Д. Уатт вместе с владельцем Карронского завода, оказывавшим ему денежную поддержку, получает патент Англии № 013 на "Способ уменьшения потребления пара и вследствие этого — топлива в огневых машинах".

Работа над точными приборами имела продолжение: Д. Уатт создает специальный прибор для регистрации изменения давления пара в цилиндре паровой машины в функции хода поршня — индикатор, который теперь хорошо известен всем специалистам по двигателям внутреннего сгорания (ДВС).

Исследование процесса расширения пара в цилиндре паровой машины привело Д. Уатта к созданию упомянутой выше совершенной паровой машины двойного действия, на которую он в 1783 г. получает патент Англии № 1321. В 1785 г. Д. Уатт изобретает регулятор числа оборотов двигателя, который теперь известен как регулятор Уатта и служит составной частью современных регуляторов.

Паровая машина Д. Уатта конструкции 1808 г. показана на рис. 1. Пар поступает в машину из котла, имеющего форму сундука, по паровой трубе *1*. Впуск и выпуск пара из цилиндра машины осуществляются с помощью клапанов, приводящихся от эксцентрика, насаженного на вал. Чугунный балансир приводится в движение от штока поршня посредством параллелограмма Уатта. Второй конец балансира соединяется с главным валом машины с помощью чугунного шатуна *2* и кривошипа (тоже чугунного). Ввиду малой

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 81)

Компания Konica Minolta (г. Санкт-Петербург) предложила спектрофотометры и колориметры, изготовленные в Японии.

Портативный спектрофотометр CM-2600, использующий измерительную систему с применением цифрового контроля зеркальной и ультрафиолетовой (УФ) составляющей, обеспечивает одновременное измерение с УФ-составляющей и без нее или с регулируемой УФ-составляющей, а также с компенсацией зеркальной составляющей. Спектрофотометр выполняет точные измерения образцов с различиями в блеске за 3...4 с без их перемещения. Для возможности одновременного измерения с учетом зеркальной составляющей и без нее спектрофотометр имеет две сменные измерительные апертуры для измерения диаметров 3 и 8 мм. Прибор оснащен видоискателем с освещением и жидкокристаллическим дисплеем размерами 64 × 204 мм. Внутренняя память — 700 измерений. Масса без батареек питания ≈ 670 г.

Колориметр серии CR-400 — автономный ручной прибор для измерения цвета образцов, сравнения результатов с эталоном и отображения данных, а также хранения в памяти результатов ≈ 1000 измерений. Колориметр оснащен жидкокристаллическим дисплеем, сенсорной клавиатурой для переключения функций, трехцветной системой измерения цвета и цветовых различий для 14 стандартных цветовых шкал. Колориметр может использоваться с ПК или модулем обработки данных DP-400, являющимся одновременно и высокоскоростным графическим принтером. Приемный элемент прибора — шесть кремниевых фотодиодов. Время измерения 1 с. Интервал между измерениями 3 с. Масса 550 г.

В заключение следует отметить, что выставка показала специалистам реальную картину отрасли и рынка. На ней можно было получить маркетинговую информацию, ознакомиться с передовыми технологиями, продвинуть на рынок собственную продукцию и наладить деловые контакты. В рамках выставки прошел первый международный специализированный салон "Обработка поверхности" с тематикой: оборудование и материалы для подготовки поверхности; технологии современной обработки поверхности; современные технологии защиты от коррозии.

А. Н. Иванов, чл.-корр. АПК

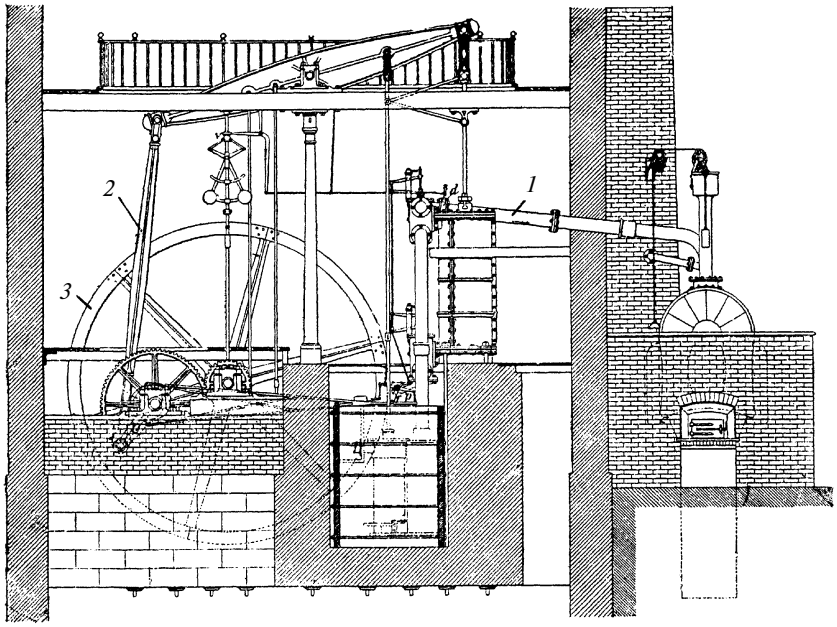


Рис. 1. Паровая машина Д. Уатта образца 1808 года

частоты вращения главного вала (n = 38 об/мин) сделана зубчатая передача ко второму валу, на который насажено маховое колесо *3*. Мощность передается потребителю ременной передачей. Конденсатор и водяной насос расположены в нижней части машины Уатта, а возле балансира сделана галлерея с лестницей для ухода за верхним подшипником. Размеры машины очень велики: диаметр — 807 мм; ход поршня — 1830 мм. При этом она развивает мощность, равную примерно 50 л. с. Первая машина с непрерывным вращением вала была построена на заводе Сохо в 1782 г. для мельницы в Кетли, а через год такие машины стали применяться и в Лондоне.

Д. Уатт непрерывно совершенствовал свою машину, что позволило ему в 1784 г. получить патент Англии № 1432 на универсальную паровую машину. К 1800 г. на заводе Уатта было построено свыше 250 паровых машин, и они начали распространяться по всему земному шару. В этом же году Д. Уатт отошел от дел по постройке машин и остаток дней провел в почете и уважении.

В начале XIX в. многие изобретатели старались применить паровую машину Уатта для железных дорог, которые до этого времени использовали конную тягу. На конкурсе паровозов 1 октября 1829 г. паровоз "Ракета" Джорджа Стефенсона развил рекордную для того времени скорость — 22 км/ч и стал победителем этого конкурса. Этому способствовало то обстоятельство, что на своем паровозе Стефенсон применил жаротрубный котел, позволявший форсировать производство пара, и кривошипно-шатунный механизм для преобразования возвратно-поступательного движения поршня машины во вращательное движение колес паровоза. Однако на новом паровозе не было конденсатора, и отработавший пар просто выбрасывался в атмосферу. При этом терялась скрытая теплота парообразования и КПД паровоза был очень низок. С другой стороны, на паровозе отсутствовал и регулятор Уатта, вместо которого был установлен клапан, которым управлял машинист, поднимавший и опускавший этот регулирующий орган для получения нужной скорости движения паровоза.

Крупнейшим пользователем машины Уатта стал железнодорожный транспорт. Расход топлива на железных дорогах России за период с 1910 по 1913 г. составил 20÷25 % от общей его добычи, и примерно 90÷95 % расходовалось исключительно паровозами.

В нашей стране только в 1955 г. был официально совершен переход от паровозов к более прогрессивным тяговым машинам — тепловозам и электровозам. Со времени Стефенсона прошло 130 лет. За это время увеличились мощность паровоза и его скорость, а также его геометрические размеры, но использование теплоты сгорания топлива осталось очень низким. Так, в 1955 г. средний КПД всего паровозного парка России составлял всего 4,5 %.

Основное усовершенствование паровозов за этот период было сделано в Германии: немецкий инженер Шмидт предложил установить после котла специальный перегреватель пара, который обогревался бы топочными газами.

Следующим преобразователем тяговых машин стал российский изобретатель Алексей Несторович Шелест. Он родился 11 февраля 1878 г. в деревне Полуянове, расположенной в 100 км севернее г. Киева, в семье отставного солдата Нестора Гордеевича Шелеста, прослужившего более 20 лет в царской армии. Своему младшему сыну Алеше Нестор Гордеевич решил дать хорошее образование: первоначально мальчик год учится в школе соседнего села Калита, затем заканчивает шестиклассную школу в г. Остере, после чего отец устраивает сына в Конотопское железнодорожное училище, которое Алеша заканчивает в 1895 г. с отличными результатами. За 11 лет работы после окончания училища А. Н. Шелест делает головокружительную карьеру: от слесаря в депо г. Конотопа до начальника технического отдела большого Люберецкого завода, поставлявшего тормозные приборы для подвижного состава железных дорог всей России.

Тяга к знаниям у молодого человека была столь велика, что он оставляет свое высокое положение, сдает экстерном экзамены за среднее учебное заведение и в 1907 г. поступает по конкурсу в Императорское Техническое Училище (ИТУ) в Москве. Его учителями были лучшие ученые того времени: механику он постигал под руководством Н. Е. Жуковского, курс "Сопротивления материалов" проходил у П. К. Худякова, а на старших курсах слушал лекции по технологии обработки металлов и дерева у первого выборного директора ИТУ А. П. Гавриленко и курс двигателей у В. И. Гриневецкого, который стал его любимым Учителем.

Во время выполнения дипломного проекта А. Н. Шелест получает патент России № 28189 на "Локомотив с двигателем внутреннего сгора-

ния (тепловоз)" с приоритетом от 22 ноября 1913 г., а вслед за этим и патент Англии № 5381 на "Локомотив, работающий продуктами сгорания под давлением" с приоритетом от 1914 г. В этом же году А. Н. Шелест пишет свою первую научную работу — «Исследование работы тепловоза фирмы "Братья Зульцер" в Швейцарии», которую передает главному редактору журнала "Вестник инженеров" П. К. Худякову, но из-за начала Первой мировой войны эта работа была опубликована только в 1917 г. (журнал № 3). В статье была показана непригодность рассматриваемого тепловоза для железных дорог, что в дальнейшем и подтвердилось при испытаниях (тепловоз был сдан в металлолом). В 1915 г. А. Н. Шелест заканчивает ИТУ и по решению Коллегии преподавателей становится в нем преподавателем, а с 1916 г. начинает читать лекции по тепловозам для студентов старших курсов. Это тем более удивительно, что первые тепловозы будут построены только через 8 лет. Своих студентов А. Н. Шелест знакомит с идеальным локомотивом, а в дальнейшем создает учение об идеальном тепловозе. По этой теории теперь строятся тепловозы во всем мире.

В 1916 г. "Общество содействия научным открытиям и изобретениям им. Х. С. Леденцова" отпускает средства для строительства тепловоза системы А. Н. Шелеста "в полном размере", но началась революция 1917 г. и деньги пропали. В 1918 г. Алексей Несторович делает доклад на 1 съезде железнодорожников России в Москве. Съезд поддержал строительство тепловозов. В 1919 г. Шелест возглавляет большие испытания паровозов на Савеловской линии Северных железных дорог. В результате этих испытаний он делает заявки на пять изобретений: автоматическую топку для паровоза; искроуловитель; топку для отопления паровоза торфом и дровами; газотурбовоз. За эти изобретения он получает на Всероссийском конкурсе пять премий, из которых четыре были первой степени и одна — второй.

Еще в студенческие годы Шелест увлеченно изучал турбины и хорошо знал их устройство. Теперь он решает применить газовую турбину на локомотиве в качестве генератора сжатых газов для поршневой машины, подобной паровозной.

Газовая турбина с постоянным давлением сгорания есть разновидность ДВС, в которой процесс сжатия совершается в отдельном компрессоре, процесс сгорания топлива — в специальной камере сгорания и расширение продуктов сгорания — в турбине, вращающей компрессор. Но если газовая турбина — разновидность ДВС, то она должна подчиняться тем же теплотехническим законам, что и ДВС. Алексей Несторович в своих теоретических работах показал, что в процессах, происходящих в тепловых машинах, играет роль не только теплота, выделяющаяся при сгорании топлива, но и величина давления, при котором происходит выделение теплоты. Если выделять теплоту при атмосферном давлении, то никакой эффективной работы мы не получим. Следовательно, более совершенный двигатель должен осуществлять сжатие воздуха до возможно большего давления. Это было новое положение, неизвестное в теплотехнике того времени.

В газовой турбине процесс сгорания проходит лучше, чем в поршневых двигателях, вследствие его непрерывности. Непрерывность процесса сгорания топлива и вынесение его в отдельную камеру позволят в дальнейшем применить и твердое топливо в пылеобразном состоянии. Последнему обстоятельству Алексей Несторович придавал большое значение, так как одним из аргументов противников тепловозов было то, что паровоз работает на твердом топливе, а тепловоз − на дефицитном жидком.

После детальной теоретической и конструкторской разработки профессор А. Н. Шелест пришел к созданию тепловоза с турбинами и 11 июня 1920 г. подал заявку на это изобретение (авторское свидетельство было получено в СССР только через 8 лет, правда, с сохранением приоритета). Схема газотурбовоза приведена на рис. 2. Двигатель состоит из компрессора *1*, камеры сгорания *2*, турбины *3* для привода компрессора, ресивера *4* для генерированных газов и рабочей машины *5*, где газы расширяются до атмосферного давления.

Предмет патента — теплосиловая установка для тепловоза с генератором сжатых газов, характеризующаяся тем, что полученные в отдельной камере сгорания газы поступают из нее сначала в турбину, приводящую в движение компрессор, снабжающий камеру сгорания сжатым воздухом, а затем подаются в ресивер, откуда расходуются рабочей расширительной машиной поршневого или турбинного типа.

Это было новое слово в развитии техники. В период с 1920 по 1922 год А. Н. Шелест находился в заграничной командировке в составе Российской железнодорожной миссии. 11 марта 1921 г. ученый подает заявку на изобретение газовой турбины постоянного давления сгорания. Изобретение отличается тем, что рабочая турбина отделена от турбины, вращающей компрессор. На это изобретение А. Н. Шелест получает Главный патент Швейцарии № 95277. Теперь такие газотурбинные двигатели применяются очень широко. Они используются на самолетах и вертолетах в качестве силовой установки для резервных электростанций, на магистральных трубопроводах для перекачивания нефти или газа, в современных танках, на морских и речных судах с газовой турбиной.

Пройдет еще много-много лет, прежде чем газовые турбины профессора А. Н. Шелеста превратятся в различные теплосиловые установки, а тогда, в 1922 г., он занялся теоретической разработкой газовых турбин с постоянным давлением сгорания.

Схема такой газотурбинной установки в тепловой диаграмме "температура—энтропия" показана на рис. 3. Здесь линия *1—2* характеризует процесс сжатия воздуха в компрессоре. Сжатый воздух из компрессора поступает в камеру сгорания жидкого или газообразного топлива, этот процесс на рис. 3 показан линией *2—3* при постоянном давлении p_2. Продукты сгорания при температуре T_3 и давлении p_2 поступают в газовую турбину, приводящую в движение компрессор. Процесс расшире-

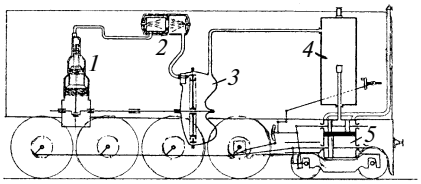


Рис. 2. Схема газотурбовоза системы А. Н. Шелеста

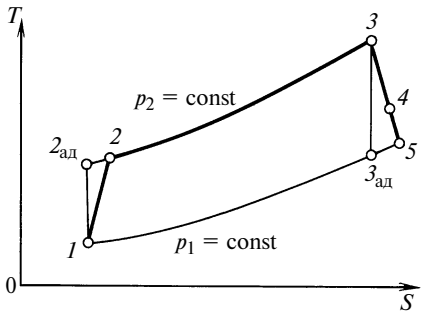


Рис. 3. Тепловая диаграмма газотурбинного двигателя

ния газов в турбине характеризуется отрезком *3—4*. При этом мощность компрессора равна мощности турбины: $N_к = N_{T_3}$. Отрезок *4—5* соответствует мощности газотурбинной установки (эффективная мощность). Из турбины *3* (см. рис. 2) газы поступают в рабочую машину *5* поршневого или турбинного типа, как это имеет место в газовой турбине вертолета и самолета с турбовинтовым двигателем, а в турбореактивном двигателе рабочей расширительной машиной является сопло Лаваля, в котором газы расширяются до давления, соответствующего высоте полета.

Следует подчеркнуть, что изображение тепловой диаграммы газотурбинного двигателя на рис. 3 весьма условно. Действительно, в компрессоре сжимается воздух, состоящий из 21 % кислорода и 79 % азота. В турбине же расширяются продукты сгорания топлива, т. е. совершенно другое рабочее тело. Другими словами, в газовой турбине используются два различных рабочих тела: воздух и продукты сгорания.

Подобно Д. Уатту, который исследовал рабочее тело своей паровой машины, профессор А. Н. Шелест занялся изучением свойств своих рабочих тел: воздуха и газов. Он пришел к выводу, что для расчета тепловых машин недостаточно знать только температуру и давление рабочего тела, а нужна еще характеристика самого рабочего тела. И профессор А. Н. Шелест находит такую характеристику! Вернемся к воздуху, сжимаемому в компрессоре. Он состоит из двухатомных газов: кислорода O_2 и азота N_2, поэтому число атомов в воздухе можно записать одним целым числом $z = 2$. Продукты полного сгорания топлива состоят из смеси двухатомных газов кислорода и азота, а также из трехатомных газов водяных паров и углекислого газа. Обозначим молекулярное содержание продуктов сгорания: M_{O_2}; M_{N_2}; M_{H_2O} и M_{CO_2}. Среднее число атомов в продуктах сгорания может быть определено по формуле

$$z = \frac{2(M_{O_2} + M_{N_2}) + 3(M_{H_2O} + M_{CO_2})}{M_{O_2} + M_{N_2} + M_{H_2O} + M_{CO_2}}.$$

Таким образом, характеристика рабочего тела — воздуха определяется целым числом, а для продуктов сгорания — это дробное число, больше двух и меньше трех: $2 < z < 3$.

Как же использовать для расчета тепловых машин характеристику рабочего тела, предложенную профессором А. Н. Шелестом? И в этом случае Алексей Несторович находит ответ на поставленный вопрос. В 1922 г. в Германии вышла в свет его книга "Теплоемкости газов и паров" (на немецком языке). В ней он впервые сформулировал новый закон теплоемкостей, действующий в природе вне зависимости от воли людей: "Молекулярные теплоемкости всех тел природы при одной и той же температуре изменяются прямо пропорционально числу атомов в молекуле".

В дальнейшем ученый вывел формулы, позволяющие определять молекулярные теплоемкости всех тел природы в функции температуры. Для газов и паров молекулярная теплоемкость составит:

при постоянном объеме

$$mC_V = 4{,}157z\left(\ln\frac{T}{98{,}1} + 1\right),$$

кДж/(моль · К);

при постоянном давлении

$$mC_p = mC_V + 8{,}314,\ \text{кДж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

На рис. 4 показана характеристика, полученная профессором А. Н. Шелестом для продуктов сгорания жидкого топлива нормального состава (С — 87 %, Н — 12 % и О — 1 %). Обо всем этом читатель может подробнее узнать из моей статьи "Фундаментальные открытия, сделанные в России" (журнал "Техника машиностроения", 2000, № 6 и 2001, № 1 и 3).

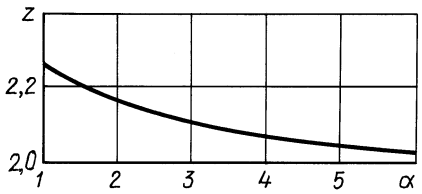


Рис. 4. Характеристика рабочего тела, полученная профессором А. Н. Шелестом, в функции коэффициента α избытка воздуха

Пока А. Н. Шелест находился в заграничной командировке, в Москве произошли события, повлиявшие на его жизнь и ускорившие постройку первых в мире магистральных тепловозов. В конце января 1922 г. состоялась коллегия наркомата путей сообщения во главе с наркомом, на которой было решено: "Немедленно приступить к сооружению взамен трех паровозов серии Э трех тепловозов: первого — по системе А. Н. Шелеста, второго — с электрической передачей и третьего — автомобильного типа с автоматической передачей." При этом новые локомотивы должны были быть не хуже паровозов серии Э, ввиду чего они получили обозначения: $Э^{Ш}$ — системы Шелеста; $Э^{эл}$ — с электрической передачей; $Э^{мх}$ — с механической передачей.

31 января 1922 г. Алексей Несторович, находившийся тогда в Вене, получил телеграмму: "Председатель Совнаркома приказал принять все меры к скорейшей постройке вашего тепловоза". Прошло еще около года, и изобретатель получил копию новой телеграммы: "Шелеста откомандируйте в Москву. С собой он должен привезти все материалы о своем изобретении. Дайте следующее распоряжение: патентные дела по изобретению А. Н. Шелеста должны оставаться в руках Шелеста и не подлежат сдаче миссии.

/Нарком путей сообщения В. Фомин."

К новому, 1923 г. Алексей Несторович вернулся в Москву, где он отсутствовал два с половиной года.

В конце января в Москве состоялся I съезд теплотехников России. На утреннем заседании съезда доклад о тепловозе системы А. Н. Шелеста сделал его друг, профессор МВТУ Б. М. Ошурков, а на вечернем заседании Алексей Несторович сделал доклад о новом законе теплоемкостей и о тех открытиях, к которым он привел. Съезд вынес благодарность докладчику и выразил пожелание издать все книги Шелеста на русском языке.

8 февраля 1923 г. состоялось заседание Высшего технического совета Народного комиссариата путей сообщения (НКПС) под председательством профессора Г. Д. Дубелира. Изложив на заседании свои идеи, касающиеся постройки нового, более совершенного локомотива, Алексей Несторович разъяснил, почему из двух своих тепловозов он выбрал для постройки тепловоз с газотурбинным двигателем. Содокладчиком выступил профессор МВТУ Н. Р. Брилинг. Назвав блестящим проект тепловоза А. Н. Шелеста, он отметил положения, которые нужно предусмотреть при его осуществлении: в первую очередь нужно обратить внимание на затруднения, которые могут возникнуть с газовой турбиной; опыты с ней не проводились ни у нас, ни за границей; необходимо ее предварительно исследовать в стационарных условиях.

Высший технический совет НКПС поддержал строительство тепловоза с газотурбинным двигателем на заграничных заводах.

17 февраля 1923 г. постройку тепловоза системы профессора А. Н. Шелеста за границей утвердила коллегия НКПС, а в марте правительство приняло по этому поводу специальное постановление, гласившее: "В дополнение постановления Совета Народных Комиссаров от 31 октября 1922 года протокол № 529 пункт Д по заказу трех тепловозов за границей, из отпущенных Российской железнодорожной миссии 1750 тысяч шведских крон 1/3 (одна треть) в размере 583 333 шведских крон забронировывается для постройки тепловоза А. Н. Шелеста...".

В первых числах мая Алексей Несторович выехал в Берлин, чтобы в Германии наладить производство своего тепловоза с турбинами. С этой целью он разослал крупнейшим машиностроительным фирмам Германии предложение о производстве нового локомотива с газотурбинным двигателем. Однако ответы пришли неудовлетворительные.

Техника того времени была еще не готова к производству столь сложного газотурбинного двигателя с постоянным давлением сгорания топлива в 50 атм. Мой отец задумался над этой проблемой и в конце концов решил вернуться к первоначальному проекту своего тепловоза с поршневым генератором сжатых газов.

По совету народного комиссара внешней торговли Л. Б. Красина он обращается к английской фирме "Армстронг—Витворт" и получает согласие на постройку тепловоза. Шелест через Лондон едет в Нью-Кастл-он-Тайн, где были расположены заводы судостроительной фирмы "Армстронг—Витворт". Обо всем этом мой отец пишет письмо своему другу, немецкому профессору Вильгельму Шюле, который считается основоположником технической термодинамики. В ответном письме В. Шюле подчеркнул: "... большое значение для локомотивов принципа машин с высоким противодавлением..." и высказал уверенность, что "... этот принцип, здоровый и правильный сам по себе, со временем осуществится на практике в той или иной форме". Заметив, что "... не только у газового турбогенератора этого рода, но и у поршневого двигателя придется преодолеть затруднения, так как поршневой двигатель внутреннего сгорания, работающий с большим противодавлением и высоким зарядным давлением, должен переработать значительно большее количество топлива при том же объеме цилиндра, чем обычный двигатель внутреннего сгорания". В. Шюле обещал оказать А. Н. Шелесту "содействие советом и делом" в его работе в Англии.

Джеймс Уатт создал только одну паровую машину, а наш соотечественник Алексей Несторович Шелест изобрел двигатели внутреннего сгорания двух типов. Его авторские права на двигатели типа 1 защищены сразу двумя патентными документами: патентом царской России № 28189 с приоритетом от 22 ноября 1913 г. и патентом Англии № 5381 с приоритетом от 3 марта 1914 г. Авторские права А. Н. Шелеста на двигатели типа 2 охраняет Главный патент Швейцарии № 95277 с приоритетом от 11 марта 1921 г.

В Англии Алексей Несторович руководил созданием своего тепловоза с двигателем типа 1 (рис. 5) с четырехтактным генератором сжатых газов, но может быть сделан и двухтактный генератор сжатых газов. Поясним принцип действия двигателя типа 1. Воздух из компрессора *2* (рис. 5, *а*) после сжатия по линии *13—14* (рис. 5, *б*) индикаторной диаграммы подается к двигателю *1*, пройдя трубопровод *3*, воздушный ресивер *4*, трубопровод *5* и в период впуска через клапан *6* поступает в цилиндр двигателя *1*, заполняя весь его полезный объем (точка *17* (рис. 5, *в*) на индикаторной диаграмме двигателя *1*).

Период сжатия. В верхней мертвой точке хода *l* поршня цилиндра двигателя *1* клапан *6* закрывается, разобщая ресивер *4* и двигатель *1*, и воздух сжимается по линии *17—18* (см. рис. 5, *в*). Около верхней мертвой точки начинается подача нефти, которая сгорает примерно по линии *18—19*.

Период расширения. Начиная с точки *19*, газы расширяются по линии *19—20*. В точке *20*, близкой к нижней мертвой точке хода поршня, в цилиндр сжатым воздухом высокого давления распыляется вода, благодаря чему высокая температура газов понижается до желаемого значения. Вследствие понижения температуры уменьшается и давление (примерно по линии *20—21*), если в охлаждении участвует вода.

Период выталкивания начинается с точки *21*, далее — по линии *21—22*. В этот период клапан *8* (см. рис. 5, *а*) открыт, и продукты сгорания вытал-

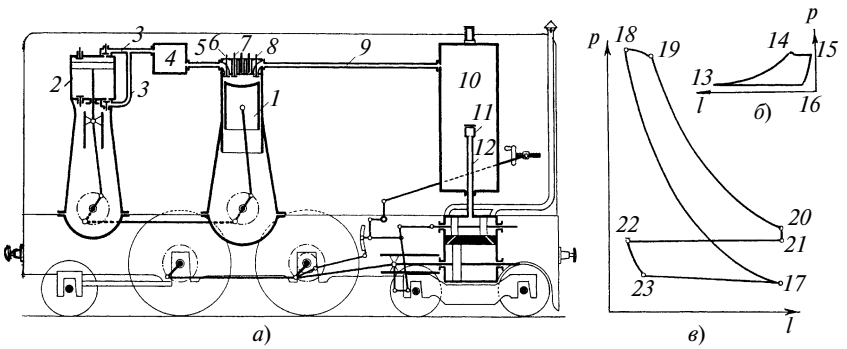


Рис. 5. Схема тепловоза с двигателем системы А. Н. Шелеста по английскому патенту № 5381 (*а*), индикаторные диаграммы компрессора (*б*) и двигателя (*в*)

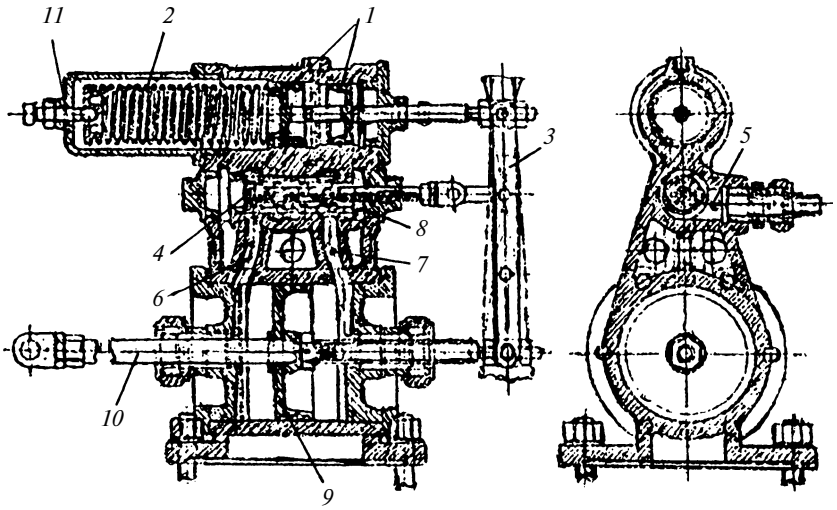


Рис. 6. Регулятор системы А. Н. Шелеста

киваются через трубопровод *9* в газовый резервуар *10*.

Период всасывания. При положении поршня в верхней мертвой точке клапан *8* закрывается. Оставшиеся в цилиндре газы расширяются по линии *22—23* (см. рис. 5, *в*). В точке *23* опять устанавливается сообщение цилиндра двигателя *1* с ресивером *4*, и воздух из ресивера вновь заполняет весь полезный объем цилиндра двигателя по линии *23—17*. С точки *17* описанный выше цикл повторяется, определяя совместную работу компрессора с двигателем.

Избыточная площадь индикаторной диаграммы двигателя соответствует работе трения самого двигателя и работе компрессора *2*. Таким образом, двигатель не производит эффективной работы, а доставляет в резервуар газы высокого давления при температуре, неопасной для рабочей машины локомотива.

Так же как и Д. Уатт, А. Н. Шелест изобрел для своих двигателей специальный регулятор (рис. 6), поддерживающий в резервуаре *10* (см. рис. 5, *а*) или постоянное, или изменяющееся в определенных границах давление. Он состоит из двух небольших поршней, образующих дифференциальный поршень *1* (см. рис. 6), нагруженный пружиной *2*. Пространство между поршнями соединяется с газовым резервуаром *10* (см. рис. 5, *а*). Нижняя часть регулятора представляет собой обычный сервомотор, применяемый на морских двигателях большой мощности. При нормальном давлении в резервуаре *10* и максимальном расходе газа рабочими машинами поршень *1* (см. рис. 6) занимает правое положение. В это время генератор газов работает с тем расходом топлива, на который он рассчитан.

Если расход газа уменьшится, то давление в резервуаре *10* увеличится. Тогда газы, действуя на разность площадей поршней дифференциального поршня *1*, преодолевают усилие пружины *2* и передвигают поршень *1* влево. Последний своим штоком с помощью рычага *3* передвигает золотник *4* сервомотора. Благодаря этому устанавливается сообщение масляной напорной линии *5* через канал *6* с левым пространством цилиндра и одновременно устанавливается сообщение правого пространства через канал 7 с отводящим масло трубопроводом 8.

Поэтому поршень *9* передвигается вправо до тех пор, пока золотник *4* не займет положение, показанное на рис. 6. Тогда по обе стороны поршня *8* устанавливается одинаковое давление, и перемещение прекращается. Шток *10* поршня *9* действует через рычаги на органы подачи топлива, уменьшая его подачу. Энергия двигателя также уменьшается, сопротивление же (работа компрессора и механические потери) остается постоянным. Вследствие этого частота вращения генератора уменьшается, что влечет за собой уменьшение количества подаваемых в резервуар *10* (см. рис. 5, *а*) газов, и давление в последнем уменьшается. Тогда под действием пружины *2* (см. рис. 6) дифференциальный поршень *1* перемещается влево, что обусловливает перемещение золотника *4* сервомотора влево. Этому движению соответствует увеличение подачи топлива в двигатель, благодаря чему уменьшается его частота вращения.

Из сказанного ясно, что частота вращения генератора зависит от расхода газа рабочей машиной локомотива и от установившегося в резервуаре *10* (см. рис. 5, *а*) давления, которое регулятор автоматически поддерживает постоянным. Нужное давление устанавливается с помощью пружины *2* и винта *11* (см. рис. 6). Между подачей топлива и подачей охлаждающего тела (для понижения температуры) существует определенная зависимость, которая легко достигается практическим путем — изменением нажатия на пружину *2*.

В конструкцию генератора сжатых газов тепловоза, который строился в Англии (рис. 7), А. Н. Шелест внес существенные изменения. Теперь двигатель *1* (см. рис. 5, *а*) и компрессор *3* были объединены в одном цилиндре со ступенчатым поршнем, с помощью которого образовалась неразрывная связь двигателя с компрессором. В верхней головке двигателя были расположены впускной и выпускной клапаны, а также форсунки для подачи топлива и охлаждающей воды. Кроме того, в головке имелся кран для установки индикатора. Головка цилиндра двигателя прошла испытания и доводочные работы на специальном стенде, благодаря чему удалось значительно сократить доводочные работы при испытании уже готового генератора газов. По договоренности с администрацией завода фирмы "Армстронг—Витворт" было решено изготовить сначала только один отсек генератора

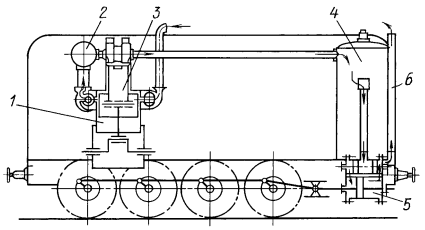


Рис. 7. Схема тепловоза системы А. Н. Шелеста:
1 — зарядный компрессор; *2* — ресивер наддувочного воздуха; *3* — цилиндр сгорания; *4* — ресивер продукта сгорания; *5* — рабочая машина; *6* — выпускная труба

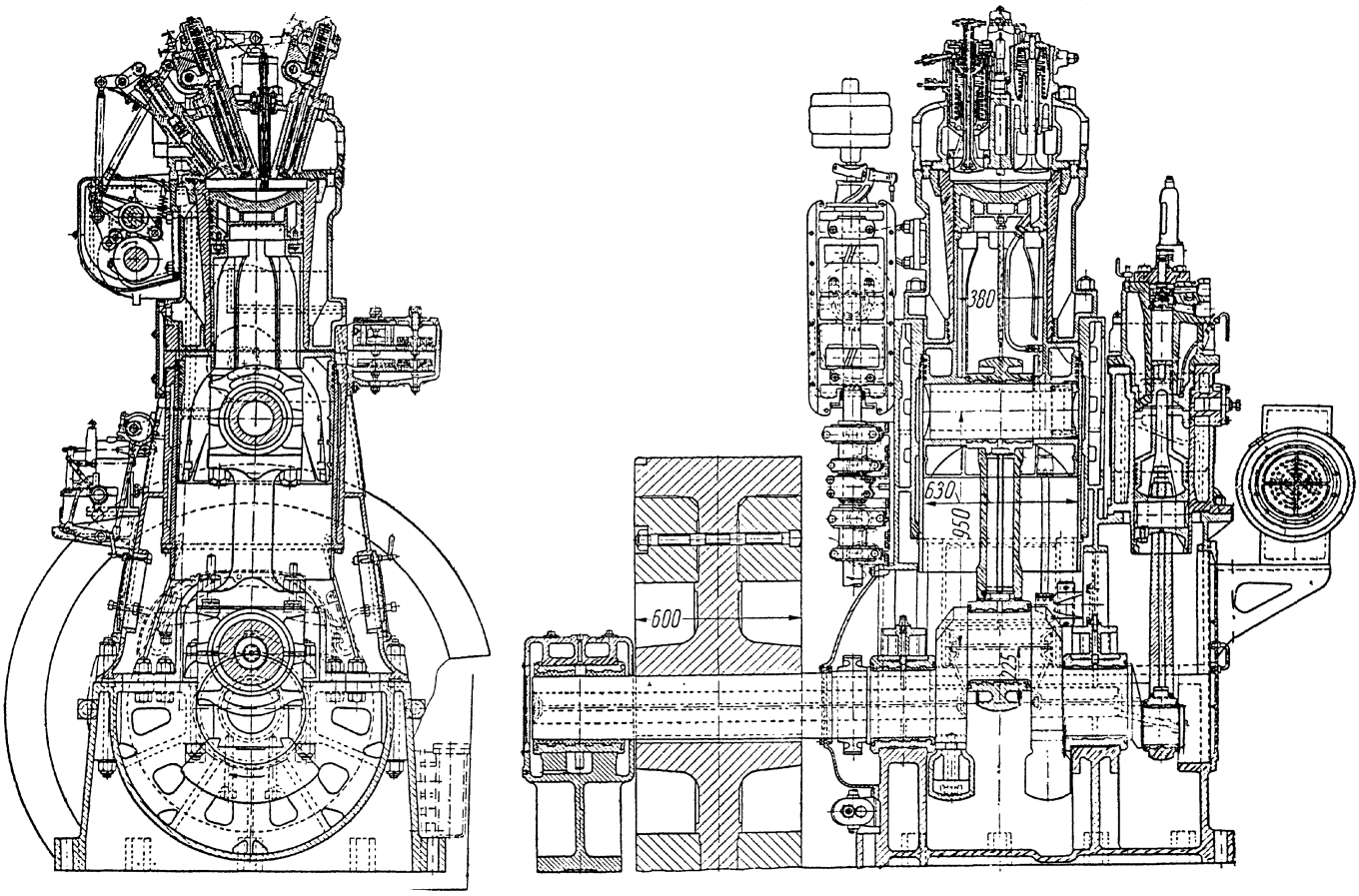


Рис. 8. Продольный и поперечный разрезы четырехтактного генератора сжатых газов системы А. Н. Шелеста

сжатых газов, чтобы после его всестороннего испытания строить шестицилиндровый генератор для тепловоза мощностью 1000 л. с.

На рис. 8 показаны продольный и поперечный разрезы четырехтактного генератора сжатых газов, построенного под руководством профессора А. Н. Шелеста в Англии. Диаметр цилиндра двигателя составляет 380 мм, а цилиндра компрессора — 580 мм при общем ходе ступенчатого поршня 460 мм.

Впускной клапан на головке двигателя — обычной конструкции, а для выпускного клапана (рис. 9), который работает при особенно высоких давлениях, Алексей Несторович изобрел специальное устройство для разгрузки его от высоких давлений — уравновешивающий поршень *6*, диаметр которого равен диаметру выпускного клапана. С помощью специальных отверстий к верхней поверхности поршня *6* подводится давление газов из цилиндра двигателя. В результате при открытии выпускного клапана приходится преодолевать только усилие пружины клапана.

Параллельно с изготовлением генератора сжатых газов шло проектирование и всего тепловоза (рис. 10) с двигателем паровозного типа, приводящим в движение колеса тепловоза (колесная формула локомотива 0—5—0 соответствовала колесной формуле паровоза серии Э).

Строительство тепловоза в Англии шло весьма успешно, чему немало способствовало непосредственное руководство работами самим автором. Отвечая на запрос Советского правительства о ходе работ над тепловозом А. Н. Шелеста, директор завода в Ньюкастле-он-Тайн мистер Ли писал: "В первый раз в своей жизни и своей практике я встретился с таким изобретателем, который ясно представляет свою машину еще в чертежах рабочего проекта. Мистер Шелест захватывает любой вопрос, возникающий при постройке тепловоза, необыкновенно широко и дает ему ясное и правильное толкование. На нашем заводе работали десятки различных изобретателей, в том числе изобретатель паровой турбины Парсонс, но такого изобретателя как мистер Шелест мы не видели. Это не только мое мнение, но и мнение других инженеров завода".

Такая моральная поддержка укрепляла уверенность изобретателя в успешном завершении постройки тепловоза с новым оригинальным двигателем. Однако в Москве многие железнодорожники относились к строительству тепловозов иначе. В то время на всех дорогах мира безраздельно господствовал паровоз. Многие паровозники видели в тепловозе нежелательного конкурента своему локомотиву. В конце июня 1926 г. для проверки хода строительства тепловоза в Англию была направлена комиссия, состоявшая всего из двух человек: профессора Б. М. Ошуркова и сопровождавшего его чекиста С. С. Терпугова. Члены комиссии в экспериментальном цехе наблюдали в течение рабочего дня за работой генератора сжатых газов (машина безостановочно работала 7 ч), после чего члены комиссии решили обменяться мнениями с администрацией завода. С английской стороны на совещании присутствовали гене-

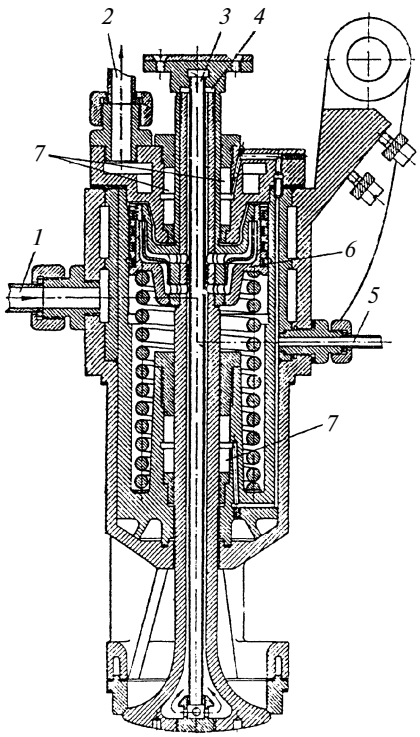


Рис. 9. Выпускной клапан с уравновешивающим поршнем:
1 и *2* — вход и выход из корпуса; *3* и *4* — вход и выход воды из клапана; *5* — вход смазки; *6* — уравновешивающий поршень; *7* — металлическая набивка

ральный директор фирмы "Армстронг—Витворг" Джордж Хедкок и директора Ли и Эрвинг, с русской стороны были Ошурков, Терпугов и Шелест. Представители фирмы считали, что "двигатель работает весьма хорошо и обещает большой успех". Однако члены комиссии пришли к другому выводу: "Пробный генератор, разрешив вопрос о возможности реализации цикла профессора А. Н. Шелеста, в то же время далек от решения вопроса в конструктивном отношении". Комиссия предложила направить письмо администрации завода о прекращении строительства тепловоза.

Решение комиссии возмутило не только Шелеста, но и других русских инженеров, участвовавших в создании тепловоза. Особенно резко выступил М. В. Коллонтай, в частности сказавший: "Мы не можем равнодушно смотреть на прекращение строительства машины, которая уже начала успешно работать. Фирма хочет продолжать постройку. При этом половину расходов по строительству тепловоза несут англичане, которые зря тратить деньги не будут...". Однако Ошурков и Терпугов игнорировали все доводы и составили проект письма, настаивая, чтобы и Шелест его подписал. Алексей Несторович категорически отказался сделать это и послал телеграмму в Лондон Л. Б. Красину с просьбой о помощи. Через день из Лондона приехал начальник технического отдела торгпредства в Англии А. А. Постников, но было уже поздно: комиссия уехала в Москву.

Алексей Несторович тяжело переживал остановку работ по созданию совершенного тепловоза, ведь это была мечта его жизни. Он решил ехать в Москву, чтобы там продолжать борьбу за тепловоз.

В Москве А. Н. Шелест прежде всего обратился к директору МВТУ Н. П. Горбунову, с которым был знаком еще по работе в ВСНХ. Горбунов был возмущен тем, что постановление Правительства о постройке тепловоза Шелеста за границей сорвали чиновники НКПС, и оказал решительную поддержку изобретателю. Научно-техническая общественность столицы поддержала постройку тепловоза в Англии на заседании Московского отделения Всесоюзной ассоциации инженеров после доклада Алексея Несторовича, во время которого он демонстрировал диапозитивы с чертежами генератора газов на испытательном стенде в Англии, индикаторные диаграммы всех полостей машины и чертеж строящегося тепловоза. Эти действия имели успех: было принято решение Правительства о продолжении строительства тепловоза в Англии.

Насколько ученые Запада были заинтересованы работами нашего соотечественника, показывает то обстоятельство, что ассистент лучшего в Англии специалиста по термодинамике Партингтона доктор-профессор Шиллинг решил перевести на английский язык все работы Шелеста и принять участие в проверке теплоемкостей двухатомных газов. Заводоуправление шло на изготовление соответствующей установки, а Кембриджское общество точных приборов бесплатно предоставляло Шелесту не только точнейшие приборы, но и специалистов для работы с ними.

Весной 1927 г. А. Н. Шелест выехал в Нью-Кастл-он-Тайн, чтобы продолжить строительство своего тепловоза с оригинальным двигателем, специально предназначенным для транспортных машин. На заводе его приняли очень радушно. Вновь началась напряженная работа, однако почти год был потерян из-за интриг чиновников НКПС. Казалось, что теперь ничто не может помешать окончанию строительства тепловоза. Однако вскоре все изменилось.

В мае 1927 г. министр иностранных дел Англии Чемберлен по поручению правительства объявил о разрыве дипломатических отношений

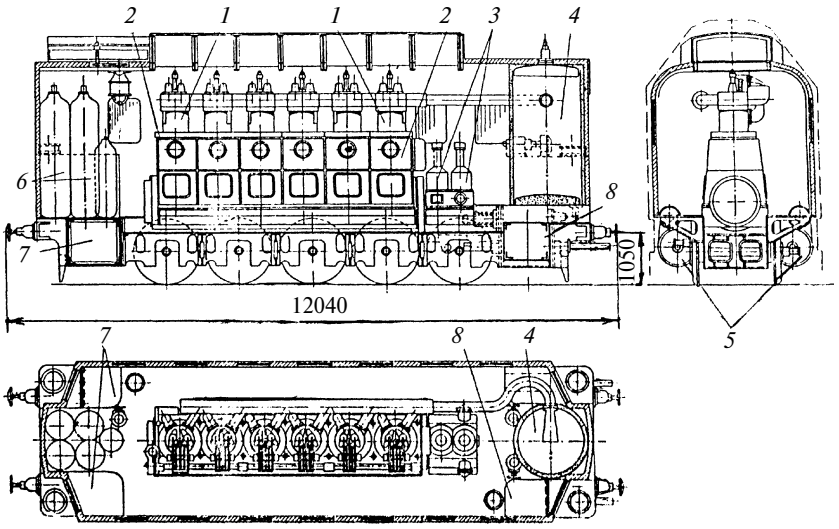


Рис. 10. Схема тепловоза с механическим генератором газов системы А. Н. Шелеста:
1 — цилиндры сгорания; *2* — зарядные компрессоры; *3* — компрессоры для распыления топлива; *4* — газовый резервуар; *5* — рабочие цилиндры; *6* — пусковые бутыли; *7* — баки для воды; *8* — баки для топлива и смазки

между СССР и Англией (они были возобновлены только через два с половиной года — в октябре 1929 г.). Разрыв дипломатических отношений с Англией сразу сделал невозможным окончание строительства тепловоза на заводе фирмы "Армстронг—Витворт". С последними дипломатическими представителями А. Н. Шелест выехал на родину, а в трюме парохода, который вез его в Ленинград, находился бережно упакованный четырехтактный генератор сжатых газов. Пока пароход плыл, Алексей Несторович имел возможность обдумать создавшееся положение. Построить тепловоз в России тогда не представлялось возможным, ибо в период первой пятилетки все центральные газеты писали, что мы отстаем от передовых капиталистических стран на 50÷100 лет, и это отставание надо преодолеть за 2—3 пятилетки. Но и бросать так успешно начатое дело нельзя. В самом деле, сердце тепловоза — генератор сжатых газов — построен, проверен и показал высокую работоспособность. Значит, надо провести всесторонние испытания генератора, а это можно сделать только в специально оборудованной лаборатории. Следовательно, нужно сначала организовать такую лабораторию, привлечь к работе в ней молодых сотрудников, сделать их энтузиастами тепловозостроения и в дальнейшем превратить лабораторию в центр научной мысли по тепловозостроению.

В Москве А. Н. Шелест начал хлопоты по созданию лаборатории. Его настойчивость увенчалась успехом: 1 июля 1927 г. Совет Труда и Обороны принял постановление о создании при МВТУ "Лаборатории тепловозных машин системы А. Н. Шелеста". Были отпущены средства для строительства специального машинного зала и переоборудования нескольких комнат в крыле старого дворца, занимаемого МВТУ. Кроме того, НКПС выделил средства в иностранной валюте для закупки за границей приборов и необходимого оборудования. Пока шло строительство машинного зала, А. Н. Шелест выехал в Европу, где приобрел для своего двигателя недостающие расширительные рабочие машины: поршневую машину двустороннего действия, подобную паровой машине Уатта, и паровую турбину, которая должна была работать на сжатом газе от генератора.

Алексей Несторович тщательно готовился к проведению испытаний, для механиков он составил специальную инструкцию с описанием генератора сжатых газов и с указаниями по обслуживанию машины.

Чтобы понять дальнейшие события, надо представить себе атмосферу жизни МВТУ [с 1928 по 1944 гг. — Московский Механико-Машиностроительный Институт (МММИ)] в период первой пятилетки. В 1932 г. в здании Большого театра торжественно отмечался 100-летний юбилей этого высшего технического учебного заведения. В докладе секретаря Московского комитета ВКП(б) о самом МММИ было сказано следующее: "Высшая школа и, в частности, бывшее МВТУ было одной из сильнейших крепостей контрреволюции на протяжении целого ряда лет после героических побед большевиков на многочисленных фронтах Гражданской войны."

Естественно, что при таком мнении партийного руководства об МВТУ основные вопросы доверяли решать не Ученому совету Училища, а партийной ячейке, которая на одном из своих заседаний и постановила, что нельзя доверять старому профессору, да еще с дореволюционным стажем преподавания в Императорском Техническом Училище, проведение столь важных испытаний нового двигателя. Это важное дело можно доверить только молодому коммунисту. Так изобретатель был отстранен от испытания своего детища, а "молодой коммунист" не справился с этой задачей и тем самым похоронил идею профессора А. Н. Шелеста на многие годы.

Алексей Несторович все свое внимание сосредоточил на развитии Тепловозной лаборатории и на подготовке инженеров по новой специальности — тепловозостроение. В то время МММИ находилось в ведении Наркомата тяжелой промышленности, который на первых порах субсидировал научно-исследовательские работы "Лаборатории тепловозных машин системы А. Н. Шелеста". Штат лаборатории был утвержден в количестве 80 человек, но практически было только 64 сотрудника, да и тем приходилось работать в две смены, ибо несколько конторских комнат лаборатории не позволяли разместить больше научных сотрудников. Работы в лаборатории велись по самым разным направлениям, а таких направлений было много. Тут и испытания двигателей внутреннего сгорания, и разработка первого в СССР гидравлического преобразователя момента, спроектированного и построенного в лаборатории по струйной теории профессора А. Н. Шелеста (при испытании показал КПД, равный 80 %), и исследование процесса сгорания в камере газовой турбины, и профилирование лопаток газовой турбины, и ряд других работ, которые лаборатория проводила для разных заводов.

Для знакомства отечественных инженеров с новинками отечественной и иностранной техники А. Н. Шелест с 1930 г. начал издавать силами лаборатории журнал союзного значения "Локомотивостроение". Первый номер этого журнала с большой статьей профессора А. Н. Шелеста "Экономическое обоснование паровозов, тепловозов и электровозов" вышел тиражом 1000 экземпляров, который в то время был убыточным. Тиражи второго и третьего номеров журнала выросли, а четвертый номер вышел уже тиражом 4500 экземпляров, что свидетельствовало о растущей популярности журнала у читателей.

Для того чтобы Тепловозная лаборатория могла существовать как самостоятельная хозрасчетная единица, необходимо было иметь постоянные заказы со стороны промышленности. Но все работы, предлагавшиеся заводами, были эпизодическими.

Алексей Несторович долго думал над этой проблемой и в конце концов пришел к выводу, что лаборатория должна заниматься не только исследованиями, но и разработкой приборов для этих исследований.

В 1932 г. в Тепловозной лаборатории проводились испытания ДВС для мотовозов при различных режимах. Опыты показали, что существующие индикаторы механического типа системы Д. Уатта совершенно непригодны для снятия индикаторных диаграмм с быстроходных машин. Профессор изучил все типы индикаторов, имевшиеся в других институтах, и решил строить электропневматический индикатор типа Фарнборо английской фирмы "Добби", устранив недостатки этого прибора.

Электропневматический индикатор Тепловозной лаборатории

МВТУ дает диаграмму изменения давления в цилиндре машины, развернутую по углу поворота коленчатого вала. Запись диаграммы осуществляется путем пробивания бумаги искрой высокого напряжения, проскакивающей в тот момент, когда давление в машине равно давлению в воздушной сети прибора, что достигается с помощью специального прерывателя. Барабан прибора вращается вместе с валом машины. За один цикл на барабане прибора пробивается столько точек, сколько раз давление в цилиндре машины сравнивается с давлением в сети прибора. Медленно меняя давление в воздушной сети прибора, можно получить всю индикаторную диаграмму.

За 10 лет Тепловозная лаборатория изготовила более 100 приборов.

Распространение двигателей профессора А. Н. Шелеста

Идеи Алексея Несторовича Шелеста были подхвачены во всем мире. Еще в 1933 г. в Швеции заводом "Готаверкен" был изготовлен двухтактный генератор сжатых газов, который вместе с газовой турбиной предназначался для мотовоза мощностью 300 л. с. Генератор газов состоял из одноцилиндрового компрессора двойного действия и ДВС, работающего по двухтактному процессу и имеющего два цилиндра. И компрессор, и двигатель имели общий коленчатый вал. Давление генерированного газа было в идеальном случае равно давлению воздуха после компрессора, а практически — несколько ниже из-за гидравлических потерь при очистке и наполнении воздухом двухтактного цилиндра сгорания. Давление генерированных газов составляло 4 кгс/см^2 при температуре 500 °С. При сгорании 1 кг жидкого топлива образовывалось 72,5 кг генерированного газа.

В 1955 г. тот же завод "Готаверкен" построил двигатель системы А. Н. Шелеста для тепловоза мощностью 1000 л. с., который был принят для эксплуатации на государственных железных дорогах Швеции.

После Второй мировой войны центр тяжести производства двигателей профессора А. Н. Шелеста переместился во Францию. Здесь талантливый конструктор Пескара после 7 лет напряженной работы построил двухтактный генератор сжатых газов со свободно движущимися ступенчатыми поршнями. В цилиндре этого генератора, расположенном горизонтально, два ступенчатых поршня образовывали генератор сжатых газов. При этом поршни меньшего диаметра в центре машины образовывали цилиндр сгорания, а поршни большего диаметра — две полости компрессора. Газ из генератора направлялся к газовой турбине мощностью 1000 л. с. (а затем и 2000 л. с). Эти силовые газотурбинные установки применялись на морских и речных судах в качестве резервных электростанций, а фирма "Рено—Сигма" изготовила тепловозы с такой силовой установкой, показавшей при испытании КПД, равный 32 %, что превышает этот показатель у современных тепловозов с электрической передачей (30 %). Итак, двигатели профессора А. Н. Шелеста типа 1 предназначены для наземных транспортных и стационарных силовых установок.

Если до Второй мировой войны в авиации всех стран безраздельно господствовал поршневой ДВС, то после войны на смену ему пришли двигатели А. Н. Шелеста типа 2 с газотурбинным генератором сжатых газов и рабочей расширительной машиной в виде турбины у турбовинтовых газотурбинных двигателей и в виде сопла у турбореактивных двигателей. В настоящее время все авиационные двигатели, за исключением двигателей некоторых спортивных самолетов, являются двигателями типа 2 системы А. Н. Шелеста (рис. 11).

Всем известны двигатели внутреннего сгорания Рудольфа Дизеля. Настало время и двигателям с генераторами сжатых газов поршневого и турбинного типов присвоить имя их изобретателя Алексея Несторовича Шелеста, тем более что никто в мире не претендует на это авторство. В этом прежде всего заинтересована Россия, так как профессор А. Н. Шелест был ее гражданином. Приоритет нашего соотечественника охраняют патенты

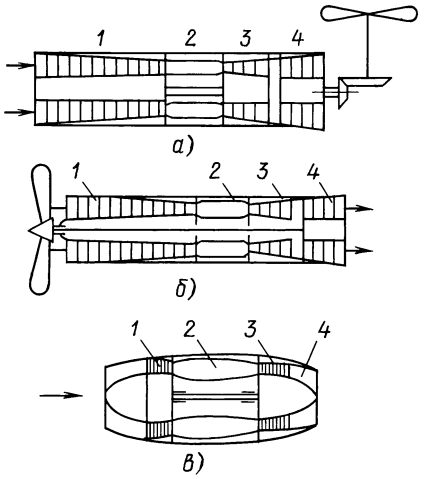


Рис. 11. Схемы газотурбинных двигателей системы А. Н. Шелеста, применяемые в авиации:
а — вертолетный двигатель; *б* — турбовинтовой; *в* — турбореактивный; *1*, *2*, *3* — турбинный генератор сжатых газов; *4* — рабочая расширительная машина-двигатель

России, Англии и Германии, а также книга "Проблемы экономичных локомотивов", изданная автором в 1923 г. на немецком и русском языках.

Подводя итоги, можно сказать, что деятельность Джеймса Уатта и Алексея Несторовича Шелеста имеет много общего. Прежде всего, их отличал большой изобретательский талант, соединявшийся с творческой исследовательской деятельностью: они не только изобрели оригинальные двигатели (Д. Уатт — паровую машину, А. Н. Шелест — двигатели типов 1 и 2), но и исследовали их рабочие тела, что привело их к новым открытиям. В ходе постройки своих машин они изобрели специальные регуляторы и индикаторы для получения изменения давления внутри цилиндров по ходу поршня. Однако судьбы их оказались разными: Джеймс Уатт умер в почете и уважении, а Алексею Несторовичу Шелесту не удалось закончить свои изобретения при жизни, среди которых и его двигатель "Машина будущего", отличающийся высоким КПД благодаря использованию теплоты топлива и воздуха, авторское свидетельство на который он получил в 1947 г. с приоритетом от 1944 г.

American Machinist. 2006. V. 150. Nr. 5

Vernyl B. Планы развития станкостроения Китая, с. 10, ил. 3.

Отмечается, что Китай является крупнейшим потребителем металлообрабатывающего оборудования в мире. Рассматривается план развития национального станкостроения на 15 лет (с 2005 по 2020 г.), принятый Правительством Китая. В нем предусматривается сокращение импорта станков с ЧПУ за счет увеличения собственного производства высокоскоростных прецизионных токарных и обрабатывающих центров, шлифовальных и электроэрозионных станков с ЧПУ, прессов, автоматических линий и специальных продукционных станков.

Вертикальные обрабатывающие центры серии Storm, с. 33, ил. 3.

Описаны вертикальные обрабатывающие центры серии Storm компании Clausing Industrial Inc. 600 Group. Станина, стойка, салазки и стол выполнены из виброустойчивого чугуна марки Meehanite, использованы коробчатые направляющие качения марки Tsubak, двухвинтовые шариковые передачи с предварительным нагружением для уменьшения люфта и 24-местное устройство автоматической смены инструмента.

Конкурентоспособные станки фирмы Okuma & Howa, с. 35, ил. 3.

Описаны новые высокоточные станки фирмы Okuma & Howa, представленные на выставке Eastech-2006. Вертикальный обрабатывающий центр мод. Mpllac 44V с жесткой конструкцией и автоматической сменой спутников имеет перемещения 560, 410, 410 мм соответственно по осям *X*, *Y*, *Z*, оснащён высокочастотным шпинделем. Горизонтальный токарный центр (ТЦ) мод. 2SP-150H обеспечивает наибольший диаметр точения 250 мм на длине до 155 мм, повышенную производительность за счет двухшпиндельной конструкции. У вертикального ТЦ мод. V100L диаметр точения составляет 1015 мм на длине до 890 мм.

Токарный центр продольного точения, с. 58, ил. 1.

Описан ТЦ мод. DECO 20s фирмы Tornos Technologies, демонстрировавшийся на выставке Eastech-2006. Станок предназначен для изготовления сложных высокоточных деталей для медицинской, автомобильной, электронной, электротехнической промышленности. Отмечается наличие двух шпинделей "зеркального размещения" с одинаковым числом резцов на главном и противошпинделе. Наибольший диаметр деталей — 20 мм, число выполняемых операций — 15, включая внутреннее и наружное точение, сверление по оси и со смещением относительно оси, осевое и поперечное фрезерование. Обе инструментальные системы имеют шесть осей (по три независимые оси).

Цанговые патроны, с. 30, ил. 1.

Фирма Royal Products предлагает серию цанговых патронов Precision ER с радиальным биением менее 2,5 мкм. Патрон имеет ступенчатый корпус с упорным фланцем, конический хвостовик и наружную резьбу на переднем конце, нажимную гайку, наворачиваемую на резьбу корпуса, и разрезную цангу. Все патроны подвергаются динамической балансировке при частоте вращения 18 000 мин$^{-1}$.

Зажимное устройство, с. 20, ил. 1.

Фирма Schunk предлагает магнитное зажимное устройство Magnos для закрепления ферромагнитных обрабатываемых деталей разных форм и размеров без изменения настройки устройства. Сочетание электромагнита и постоянных магнитов обеспечивает создание взаимно-перпендикулярных магнитных полюсов, что позволяет получать равномерные рабочие усилия при закреплении деталей.

Расточные резцы, с. 23. ил. 1.

Фирма Scientific Cutting Tools предлагает расточные резцы для обработки с высокими скоростью резания и подачей. Резцы оснащены режущими пластинами из КНБ для обработки чёрных металлов твёрдостью до 45 *HRC* или из поликристаллических алмазов, обладающих высокой стойкостью при обработке абразивных материалов (кремний, алюминий, керамика, композиционные материалы).

Роботизированная система модернизации токарных центров, с. 12. ил. 1.

Описана роботизированная система марки DS1200-MTL фирмы Distech Systems, предназначенная для загрузки и разгрузки деталей на токарных центрах с минимальным участием оператора. Система подходит для ретрофитинга большинства токарных центров. Отмечается компактность системы, подающей заготовки к шпинделю или внутреннему загрузчику станка из поддонов. Система может быть использована для процессов мойки, упаковки и штабелирования деталей, а также для загрузки и разгрузки приспособлений в процессе обработки деталей на станке.

American Machinist. 2006. V. 150. Nr. 10

Внутреннее шлифование, с. 40 – 42, 44.

Описывается опыт фирмы Saint-Gobain Abrasives в применении технологии шлифования отверстий. Приведен перечень современных абразивов и даны рекомендации по их выбору в зависимости от конкретного обрабатываемого материала. Даются также рекомендации по выбору диаметра шлифовального круга в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия.

American Machinist. 2007. V. 151. Nr. 3

Новости промышленности, с. 16, 18, ил. 2.

Описывается фрезерный станок PowerMILL 5-Axis фирмы Delcam для обработки по пяти осям, обеспечивающий быстрое и простое программирование черновой и чистовой обработки фасонных деталей и сложных профилей, например лопаток турбин авиационных двигателей. ПО позволяет создать пятикоординатный эквивалент любой объёмной траектории. Фирма Pinpoint Laser Systems освоила производство новых лазерных установок Microgage 2D для контроля отклонения от плоскостности поверхностей с точностью до 0,0025 мм на длине от 100 до 3600 м, которые включают компактный лазерный трансмиттер, ресивер и цифровой дисплей.

Дана таблица перевода параметров шероховатости R_z и R_a обработанной поверхности, соответствующих новой шкале ISO, в миллиметры и дюймы.

Benes J. Режущие инструменты, с. 20, 22—23, ил. 5.

Описываются новые инструменты и оснастка, представленные инструментальными фирмами на выставке Westech-2007. В их числе насадные фрезы серий HELI2000 и HELIPLUS фирмы Iscar Metals с крупными режущими пластинами с винтовой острозаточенной режущей кромкой; концевые фрезы Hard Cut фирмы Emuge Corp. диаметром от 2,38 до 25,4 мм из субмикронного твёрдого сплава (S-Hard-Cut и N-Cut) и поликристаллических алмазов с внутренними каналами для СОЖ; концевые фрезы Aeromaster фирмы Seco Tools для обработки буртиков и полостей при глубине резания до 7,5 мм; многогранные и круглые режущие пластины из твёрдого сплава GC4230 фирмы Sandvik Coromant для обработки сталей.

Новое оборудование и оснастка, с. 60—64, ил. 9.

Описываются оборудование и оснастка, демонстрировавшиеся на выставке Westech-2007. Так, фирма Big Kaiser Precision Tooling предлагает пневматическую шпиндельную головку Fullcut Mill FCR с регулируемой частотой вращения шпинделя до 80 000 мин$^{-1}$, прецизионную расточную головку EW2-50XL с устройством микрометрической регулировки диаметра обработки. Проволочно-вырезные электроэрозионные станки ROBOFIL 240SLP/440SLP фирмы Agie Charmilles обеспечивают шероховатость обработанной поверхности 2 мкм деталей размерами 1200 × 700 × 400 мм и массой до 1500 кг за один проход (без деления на черновую и чистовую обработки). Вращающийся центр Perfetta фирмы Dorian Tool International с шлифованными деталями из хромомолибденовой стали, закаленной до твёрдости 62 *HRC*, имеет сменную коническую головку для закрепления деталей диаметром от 98,5 до 600 мм. Фирма Toyoda Machinery представила горизонтальный обрабатывающий центр FH450-S с многоуровневым стеллажом для поддонов с автоматической системой загрузки/разгрузки, которая позволяет сократить время простоя до 10 %; универсальный шлифовальный станок SelectG с шлифовальной бабкой, поворачивающейся на угол от 90° до 60°; серию вертикальных обрабатывающих центров BM-1200 с жёсткой чугунной станиной и большим числом высокомоментных шпиндельных головок.

ASME. Journal Manufacturing Science and Engineering. 2006. V. 128. Nr. 4

Yoshino M. et al. Исследование обработки хрупких материалов, с. 837—845, ил. 14, библ. 38.

Описаны исследования обработки резанием хрупких материалов из кварцевого стекла алмазным однокромочным режущим инструментом. Подробно рассмотрено влияние гидростатического давления на характер процесса резания, в частности на образование трещин и скалывание в процессе обработки.

DIMA (Die Maschine). 2006. V. 60. Nr. 4

Обеспечение высокой производительности при фрезеровании, с. 30, ил. 1.

Фирма Sandvik Coromant (Германия) применила новые поворотные плиты (GC1030 и GC4240) для фрезерования (скругления) острых углов стальных деталей. Плита GC1030 обладает оптимальными свойствами при фрезеровании деталей из труднообрабатываемых материалов или при возникновении вибрации при резании. Плита GC4240 с CVD-покрытием служит для качественной бездефектной обработки деталей с высокой надежностью.

DIMA (Die Maschine). 2006. V. 60. Nr. 7

Автоматизированный комплекс с ЧПУ, с. 32—34, ил. 4.

Фирма Stahlbau Wendeler GmbH+Co. KG (Германия) представила новый комплекс, состоящий из круглопильного станка для резки металла HDM 1431 и системы подачи заготовок, что позволило повысить производительность заготовительного производства на 35 %. Станок может разрезать все виды профилей размером от 80 до 1100 м и высотой до 450 мм при ширине до 1250 мм и угле скоса от −45° до + 30°. Скорость резания изменяется бесступенчато. При резке автоматически измеряется поперечное сечение для контроля процесса. Дано описание системы подачи заготовок и особенностей ПО комплекса.

Измерительный стенд, с. 49. ил. 1.

Фирма Hecht Electronic разработала измерительный стенд OptoDesQ, снабженный оптической камерой, предназначенной для определения размеров металлических деталей. С помощью системы OptoDesQ, встроенной в агрегатно-производственную линию, можно в течение нескольких секунд измерить величину углов, диаметр заготовок, параллельность, степень позиционирования, расположение отверстий и их глубину. По окончании измерений оператор измерительного стенда, управляемого посредством специальной программы, получает полную документацию с результатами измерений.

Cutting Tool Engineering. 2006. V. 58. Nr. 4

Richter A. "Станки для станков", с. 10, 12, 13, ил. 1.

Рассматривается тенденция развития координатно-расточных станков (так называемые станки для станков), начиная с их выпуска в 40—50-х гг. XX века. Отмечается, что в настоящее время потребность в таких станках постоянно увеличивается, так как именно на них изготовляют высокоточные детали других станков, что обусловлено в первую очередь необходимостью точной обработки деталей из высокопрочных труднообрабатываемых титановых сплавов для аэрокосмической промышленности. В качестве примера описан вертикальный координатно-расточной станок 7CN фирмы Mitsui Seiki.

Зажимные цанги, с. 20, 21, ил. 1.

Описаны зажимные разрезные цанги для закрепления обрабатываемых деталей. Преимуществом цанг является возможность закрепления детали за внутреннюю поверхность, что оставляет большую часть детали свободной для обработки. Цанги можно использовать для закрепления фасонных деталей.

Richter A. Хонингование отверстий, с. 54, 56—60, ил. 2.

Подробно описана технология хонингования отверстий за один проход вместо многопроходного на многошпиндельных хонинговальных станках. Приводятся

данные о хонах, критерии выбора инструмента и режимов обработки, а также способы крепления, позволяющие нежёсткое ("плавающее") закрепление детали и инструмента.

Фрезерование деталей сложного профиля, с. 78—80, ил. 2.

Описан опыт фирмы Reil Industrial Enterprises по обработке отливок и деталей из алюминия 7075 и титана. Наиболее эффективными оказались инструменты Minimaster с режущими пластинами из твёрдого сплава T250M фирмы Seco Tools Canada, обеспечивающие интенсивный съём обрабатываемого материала при обработке полостей глубиной до 178 мм, и фрезы Nano Turbo с хвостовиками Combimaster и режущими пластинами XOMX из твёрдого сплава F40M.

Обработка заготовок в инструментальном производстве, с. 81, 82, ил. 1.

Фирма Advanced Carbide Grinding предлагает новую технологию с использованием шлифовальных станков Rollematic CNC 148P4 в инструментальном производстве, позволяющую сократить время обработки твёрдосплавных заготовок диаметром до 19 мм и длиной до 230 мм с 35 до 17 мин. Фирма сгруппировала шесть своих станков с ЧПУ на одном производственном участке, на котором работают всего два оператора.

Устройство для фильтрации СОЖ, с. 85, ил. 1.

Фирма Henning предлагает устройство CDF для надёжной и экономичной фильтрации и очистки от стружки СОЖ при обработке чугуна. Устройство работает в непрерывном режиме и обладает свойством самоочищения, что позволяет удалять чугунную стружку в большом объёме.

Торцевая сборная фреза, с. 85, ил. 1.

Фирма Kennametal предлагает насадную сборную торцевую фрезу KSOM Mini с механически закрепляемыми твердосплавными режущими пластинами. Фреза имеет положительную геометрию, обеспечивающую эффективную черновую обработку алюминия, чугуна, коррозионно-стойкой стали и жаропрочных сплавов. Приведены технические характеристики фрезы.

Cutting Tool Engineering. 2006. V. 58. Nr. 5

Hawey J.-A. Искусство заточки свёрл, с. 24, 26, 27, ил. 3.

Рассматриваются теория и практика заточки сверл. Отмечается, что при качественной заточке инструмент имеет острые режущие кромки, работает с малыми силами резания и обеспечивает эффективный отвод стружки. Приведены рекомендации по заточке спиральных свёрл. Например, для уменьшения силы резания следует обеспечить небольшой положительный передний угол. Подточка перемычки также уменьшает эту силу.

Kennedy B. Обработка магния на вертикальном центре, с. 28, 29, 122, ил. 1.

Фирма CNC Technologies Inc., которая является дочерним предприятием корпорации Chicago White Metal Casting Inc (США), специализируется на обработке деталей из магния. Масса таких деталей на 35 % меньше, чем алюминиевых, при той же прочности. Но стружка магния легко воспламеняется, и нужны специальные меры, чтобы предотвратить возгорание. Приводятся пример обработки магниевой крышки из заготовки 25 x 51 x 102 мм на вертикальном центре и технологические данные по инструментам и режимам резания магния.

Margolis D. Движущая сила воды, с. 44, 46—48, 50—53, ил. 4.

Описаны основные принципы абразивно-струйной обработки (AWJ) и оборудование для нее. Например, оборудование фирмы Accu Stream Inc. позволяет устанавливать по оси Z 2, 4 и даже 16 режущих головок. Установки AWJ с плазменной горелкой позволяют последовательно обрабатывать внутренние отверстия и вырезать детали по наружному контуру. Отмечается, что пропускное кольцо (из сапфира) в сопле абразивно-струйной головки является критическим элементом, который повреждается загрязнителями или водой. Алмазное кольцо снимает эту проблему и делает абразивно-струйную резку более конкурентной по сравнению с другими технологиями. Приводятся данные фирмы H_2O Jet (США) по затратам на кольца в пересчете на почасовые расходы.

Микроинструменты, с. 48.

Фирма Arch Micro Tool предлагает свыше 500 типов высокопрецизионных концевых фрез диаметром от 0,127 до 0,387 мм из сверхмикрозернистого твёрдого сплава. Фрезы имеют две или четыре стружечные канавки, прямой или сферический торец, стандартную или укороченную длину.

Kennedy B. Технологические возможности токарно-фрезерных станков, с. 54, 56—59, ил. 3.

Рассматриваются технологические возможности современных токарно-фрезерных станков с вспомогательными шпинделями, обеспечивающих обработку детали с одной установки благодаря осям Y и B. Описываются станки фирм Daewoo Mackine Tool Div (мод. Puma MX), Mazak Corp. (серии Cybertech iurn и Integrex Mark IV), Mori Seiki USA Inc. (серии NT), Okuma America Corp. (с виртуальным монитором предварительного просмотра обработки) и др.

Badger J. et al. Шлифование лопаток турбин, с. 66, 68, 70, 72, 73, ил. 4.

Основные проблемы при шлифовании лопаток турбин обусловлены материалом лопаток (никелевые сплавы), который плохо поддаётся шлифованию, и их тепловыми деформациями в процессе шлифования. Для шлифования основания и лопастей лопаток используются шлифовальные станки, работающие методом ползучей подачи. Приведены технология шлифования и схемы непрерывной правки кругов.

Брошюра по проволочно-вырезным электроэрозионным станкам, с. 121, ил. 1.

В брошюре приведены технические характеристики и спецификации станков CHMER фирмы Ching Hung Machinery & Electric Industrial Co. Ltd., в графическом виде даны инструкции по их эксплуатации и установке, а также цветные изображения поставляемых машин.

Cutting Tool Engineering. V. 58. Nr. 11

Представлен 21-й ежегодный справочник, который разделен на 15 рубрик в зависимости от способа обработки и видов оборудования и инструментов. Общий список оборудования и инструментов структурирован в алфавитном порядке на с. 10, 11; информация о выпускаемых изделиях представлена на с. 13—138; информа-

ция о компаниях, выпускающих оборудование, — на с. 139—162; перечень 450 дистрибьюторов и сведения о них — на с. 163—186; глоссарий новых терминов, используемых в области обработки металлов, − на с. 187—204; перечень ассоциаций и институтов в области машиностроения — на с. 221, 222; перечень компаний, которые представят свою продукцию в 2007 г., — на с. 223—226.

Form + Werkzeug. 2006. Nr. 3

Высокоскоростные обрабатывающие центры серии Gantry RS, с. 45, ил. 1.

Центры, выпускаемые фирмой Handtmann (Германия) для обработки композитов, могут выполнять пятикоординатную обработку, отличаются быстрыми скоростями перемещений (до 70 м/мин), ускорениями до 8 м/с^2, скоростью поворотов до 180 °/с и частотой вращения шпинделя до 30 000 мин$^{-1}$.

Обрабатывающие центры фирмы YASDA, с. 50/1, 50/2, ил. 3.

Описаны центры серии YBM с гибридными направляющими и максимально жесткими шпинделями большого диаметра. Центры обеспечивают надежное позиционирование, имеют длительный срок службы, производительность обработки стали твердостью 60 *HRC* составляет до 11 см^3/мин, имеют высокую термостабильность, оснащены системой управления Fanuc 31i-A5 и магазином на 180 инструментов. Приведены технические характеристики этой серии, состоящей из четырех моделей.

Обрабатывающий центр с линейными двигателями, с. 50, ил. 1.

Центр мод. FZ 38 фирмы Zimmermann-Boko (Германия) оснащен линейными электроприводами фирмы Siemens со скоростью перемещения до 60 м/мин и фрезерной головкой VH 6 с моментным двигателем в качестве привода. Головка имеет два сменных шпинделя для обработки алюминия, композитов, легкой черновой обработки стали и чугунов и для чистовой обработки сложных контуров. Центр рекомендуется для применения в инструментальной и авиационной промышленности.

Комплексная ручная измерительная система, с. 58—61, ил. 5.

На новом автомобильном заводе в Лейпциге фирмы BMW (Германия) в кузовном цехе установлена ручная измерительная установка, представляющая собой сочетание известного координатно-измерительного устройства Probe-T и разработанного фирмой Leica Geosystems лазерного теодолита LTD 800. Точность измерений составляет ± 10 мкм/м в измерительном пространстве диаметром 80 м. Подробно описаны возможности этой головки.

Ремонтный лазерный модуль, с. 62, 63, ил. 4.

Фирма ThyssenKrupp Drauz Nothelfer GmbH (Германия) разработала лазерный модуль OptoRep с размерами 8 × 6 × 5 м и полупроводниковым лазером мощностью 3 кВт на портальном роботе, предназначенный для ремонта и модернизации применяемой в кузовном производстве технологической оснастки (штампов) с размерами до 5 × 2 м и массой до 60 т. Лазер может использоваться для закалки отдельных участков, выполнения наплавки с целью восстановления размеров и ряда других ремонтных операций.

Программное обеспечение для инструментального производства, с. 73. ил. 1.

Программное обеспечение версии 13.1, разработанное фирмой Mecadat CAD/CAM (Германия), предназначено для использования в инструментальном производстве при двух- и трехмерной обработке с учетом кинематики станков, причем исключаются возможности столкновений движущихся узлов и агрегатов. Кроме того, версия предусматривает «интеллектуальное» использование нормализованных узлов из имеющихся каталогов.

ПОТАПОВА Г. С.

По вопросам получения материалов из зарубежных журналов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru