# ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**3**
**2008**

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

# CONTENTS


**КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН**

**Афонин С. М.** — Абсолютная устойчивость систем управления электромагнитоупругими приводами наноперемещений . . . 3

**Никифоров С. О., Мархадаев Б. Е., Мандаров Э. Б.** — Быстродействующие циклоидальные манипуляторы с пространственным движением рабочего органа . . . 8

**Ванчиков В. Ц.** — Контактные силы в узлах трения машин . . . 11

**Уткин В. С.** — Расчет индивидуальной клиноременной передачи по условиям тяговой способности и долговечности . . . 15

**Зайчиков А. Ф.** — Надежность систем . . . 19

**Гринчар Н. Г.** — Анализ изменения состояния гидропривода мобильных машин в процессе эксплуатации . . . 24

**Вихренко Д. В.** — Расчетно-экспериментальный метод оценки долговечности деталей сложной конфигурации с концентраторами напряжений . . . 27

**Соколов С. В., Гольцев А. В.** — Неразрушающий контроль трибосопряжений в условиях помех с применением линейной фильтрации сигнала акустической эмиссии . . . 30

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

**Бирюков В. П.** — Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения . . . 33

***Металлургическое оборудование и прокатное производство***

**Делюсто Л. Г.** — Оценка влияния слабого постоянного магнитного поля на механические свойства проката . . . 37

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Шашок А. В.** — Прогнозирование надежности операций токарной обработки по показателям качества изготовляемой продукции . . . 41

**Еренков О. Ю., Захарычев С. П., Гаврилова А. В., Отмахов Д. В.** — Влияние условий механической обработки полимерных материалов на твердость обработанной поверхности детали . . . 46

**Котельников В. И., Краснов А. О.** — Изменение усилия резания при обработке наплавленного слоя . . . 50

**Багиров С. А.** — Особенности формирования геометрических параметров поверхностей при внутреннем шлифовании . . . 52

***Серия статей***
***«Проблемы теории и практики резания материалов»***

**Воронцов А. Л., Султан-заде Н. М., Албагачиев А. Ю.** — Разработка новой теории резания. 3. Современная теория разрушения при пластической деформации . . . 54

**ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА**

**Тевелев М. Ю.** — Основы организационно-экономического управления качеством на машиностроительном предприятии . . . 62

**Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** — Оценка предполагаемого спроса на потребительские товары методом анализа иерархий . . . 67

**Клячко Л. М.** — Объект, элементы, факторы, критерии и показатели экономической безопасности системы . . . 75

**Карминский А. М.** — Методические вопросы построения конструктора динамических рейтингов . . . 80

**Биктяков К. С.** — Повышение адаптивности системы управления персоналом хозяйствующих субъектов . . . 84

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Даниленко Б. Д.** — Анализ обрабатываемости медных сплавов резанием . . . 86

**Иванов А. Н.** — Выставка "КИП Экспо-2007" . . . 87

**Потапова Г. С.** — Обозрение зарубежных изданий . . . 91

**Вниманию читателей** . . . 94, 95, 96

**DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES**

**Afonin S. M.** — Absolute stability of electromagnetoelastic nanotransfer drive control systems

**Nikiforov S. O., Markhadaev B. E., Mandarov E. B.** — Fast cycloidal manipulators with spatial motion of driven element

**Vanchikov V. C.** — Contact forces in the machine's friction units

**Utkin V. S.** — Calculation of individual V-belt drive to a reliability by a tractive ability and longevity conditions

**Zaiichikov A. F.** — A system reliability

**Grinchar N. G.** — Change of state analysis of hydraulic drive of mobile machines in the operational process

**Vikhrenko D. V.** — Design-experiment estimation method of longevity of odd-shaped parts with stress concentrators

**Sokolov S. V., Gol'tsev A. V.** — Nondestructive test of tribocouplings in noize conditions with use of linear filtration of acoustic emission signals

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

**Biryukov V. P.** — Influence of power density distribution of laser beam upon friction surfaces wearing capacity enhancement

***Metallurgical equipment and rolling-mill production***

**Delyusto L. G.** — Estimation of weak magnetostatic field influence upon mechanical properties of rolled metal

**MANUFACTURING TECHNOLOGY**

**Shashok A. V.** — A prediction of turning operations reliability by quality showings of manufactured production

**Erenkov O. Yu., Zakharychev S. P., Gavrilova A. V., Otmakhov D. V.** — Influence of conditions of polymer materials machining upon detail's machined surface hardness

**Kotel'nikov V. I., Krasnov A. O.** — Chip loading change at fused layer processing

**Bagirov S. A.** — Features of surface geometrics forming at internal grinding

***Series of articles***
***"The theory and practice problems of the materials cutting"***

**Vorontsov A. L., Sultan-Zade N. M., Albagachiev A. Yu.** — Development of a new cutting theory. 3. Modern destruction theory under plastic deformation

**PRODUCTION ORGANIZATION AND ECONOMICS**

**Tevelev M. Yu.** — Fundamentals of economic—organizing management of product quality on the engineering plant

**Andreiichikov A. V., Andreiichikova O. N.** — Estimation of prospective market on consumer products by hierarchy analysis technique

**Klyachko L. M.** — Object, elements, factors, criteria, and showings of a system's economic security

**Karminskii A. M.** — Methodical aspects of dynamic rate designer formng

**Biktyakov K. S.** — Improvement of managerial personnel control systems adaptability

**TECHNICAL INFORMATION**

**Danilenko B. D.** — Analysis of copper alloys workability by cutting

**Ivanov A. N.** — The "KIP Expo-2007" exhibition

**Potapova G. S.** — Review of foreign editions

**Information** for the readers



Художественный редактор *Т. Н. Галицына*
Технический редактор *О. А. Ефремова*
Корректор *З. В. Наумова*

Сдано в набор 27.12.2007. Подписано в печать 12.08.2008.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,76. Уч.-изд. л. 14,27. Заказ 142.



*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", 2008

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 539.3:534.1

С. М. АФОНИН, канд. техн. наук [МГИЭТ (ТУ)]

## Абсолютная устойчивость систем управления электромагнитоупругими приводами наноперемещений

На фазовой плоскости для системы управления электромагнитоупругим преобразователем с гистерезисной характеристикой множеством положений равновесия является отрезок. В системе управления деформацией возможны автоколебания. Определены условия абсолютной устойчивости систем управления электромагнитоупругими преобразователями для нано- и микроперемещений при детерминированных и случайных воздействиях.

### Введение

Применение точных электромеханических приводов, работающих на основе электромагнитоупругости (пьезоэлектрического, пьезомагнитного, электрострикционного, магнитострикционного эффектов), перспективно в оборудовании нанотехнологии, нанобиологии, энергетики, микроэлектроники и адаптивной оптики для прецизионного совмещения, компенсации температурных и гравитационных деформаций, атмосферной турбулентности. Нанотехнология — это направдение в технологии и прецизионном оборудовании, когда вместо обработки "сверху вниз" с получением деталей или готовых изделий из заготовок путем отделения ненужных частей происходит сборка или самосборка "снизу вверх" при безотходном процессе производства изделий из атомов и молекул с соответствующими наноперемещениями электромагнитоупругих преобразователей энергии. Точные приводы работают в пределах рабочих нагрузок, обеспечивающих упругие деформации исполнительного электромагнитоупругого преобразователя. Пьезопреобразователи имеют высокие величины пьезомодулей, поэтому часто применяются для наноперемещений. Пьезопреобразователь работает на основе обратного пьезоэффекта, перемещение достигается за счет его деформации при приложении электрического напряжения [1—3].

Микро- и нанометрическая точность оборудования микроэлектроники и нанотехнологии обеспечивается электромеханическими системами с прецизионными приводами, основанными на деформации исполнительного электромагнитоупругого преобразователя. В системе управления микро- и нанометрической деформацией электромагнитоупругого преобразователя энергии электрического или магнитного поля в энергию механической деформации предъявляются жесткие требования к отсутствию автоколебаний и к устойчивости системы, поскольку рабочий режим прецизионной электромеханической системы микро- и наноперемещений без обеспечения абсолютной устойчивости системы управления деформацией может оказаться вообще нереализуемым. Аналитические выражения условий абсолютной устойчивости системы с гистерезисной нелинейностью записываются с использованием критерия абсолютной устойчивости Якубовича, развивающего критерий абсолютной устойчивости Попова [4, 5]. Для системы управления, устойчивой по Ляпунову, критерий абсолютной устойчивости Якубовича для систем с одной гистерезисной нелинейностью дает наиболее простое и наглядное представление результатов исследования устойчивости и возможность синтеза корректирующих устройств системы, обеспечивающих устойчивость системы управления [6].

### Множество положений равновесия электромагнитоупругого преобразователя

Динамические характеристики пьезопреобразователя рассчитываются на основании совместного решения волнового уравнения и уравнения пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях. При расчете пьезопреобразователей используется волновое уравнение [2, 3], описывающее распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений,

$$\frac{1}{(c^E)^2}\frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E}\frac{\partial\xi(x,t)}{\partial t} + \alpha^2\xi(x,t) = \frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial x^2},$$

где $\xi(x, t)$ — смещение сечения пьезопреобразователя; $x$ — координата; $t$ — время; $c^E$ — скорость звука при $E = \text{const}$; $\alpha$ — коэффициент затухания.

Обобщенное уравнение пьезоэффекта [2, 3] при управлении по напряжению пьезопреобразователем записывается в виде $S_j = d_{ij}E_i + s^E_{jk}T_k$, где $S_j$ — относительное перемещение сечения пьезопреобразователя по оси $j$; $d_{ij} = d_{31}, d_{33}, d_{15}$ — пьезомодуль при поперечном, продольном или сдвиговом пьезоэффекте; $E_i$ — напряженность электрического поля в пьезопреобразователе по оси $i$; $s^E_{jk}$ — упругая податливость при $E = \text{const}$;

$T_k$ — механическое напряжение по оси $k$; индексы $j = 1, ..., 6$; $k = 1, ..., 6$; $i = 1, 2, 3$.

При одном закрепленном торце пьезопреобразователя, например при $x = 0$, получаем $\xi(x, t) = 0$ и при упругоинерционной нагрузке на пьезопреобразователь при $x = l$ имеем уравнение сил:

$$T_j S_0 = -M\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} - C_e \xi(x, t),$$

где $S_0$ — площадь поперечного сечения пьезопреобразователя; $C_e$ — жесткость нагрузки; $T_j S_0 = F$ — внешняя сила, приложенная к торцу пьезопреобразователя; $M$ — перемещаемая масса.

Определим преобразование Лапласа смещения сечения пьезопреобразователя:

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^\infty \xi(x, t) e^{-pt} dt,$$

где $p$ — оператор Лапласа.

Следовательно, передаточную функцию [2] $W_{ij}(p)$ пьезопреобразователя, закрепленного одним торцом, при упругоинерционной нагрузке для $M \gg m$ ($m$ — масса пьезопреобразователя) можно записать в виде:

$$W_{ij}(p) = \frac{\Xi_j(p)}{E_i(p)} = \frac{d_{ij} l}{\left(1 + \frac{C_e}{C_t}\right)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)},$$

где $T_t = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_t}}$; $\xi_t = \frac{\alpha l^2 C_t}{3c^E \sqrt{M(C_e + C_t)}}$.

Здесь: $\Xi_j(p)$ и $E_i(p)$ — преобразования Лапласа перемещения торца пьезопреобразователя и напряженности электрического поля в пьезопреобразователе при нулевых начальных условиях; $n$ — число пьезопластин в пьезопреобразователе; $C_t$ —жесткость пьезопреобразователя; $T_t$ и $\xi_t$ — постоянная времени колебательного звена и коэффициент затухания его колебаний при упругоинерционной нагрузке пьезопреобразователя.

Рассмотрим систему управления деформацией пьезопреобразователя. Передаточная функция линейной части системы управления имеет вид:

$$W_{ij_l}(p) = k/(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1),$$

где $k$ — коэффициент передачи линейной части системы.

Аналитическое выражение для основной обобщенной гистерезисной петли торца пьезопреобразователя [6] имеет вид (рис. 1):

$$S_j = d_{ij} E_i - \gamma_{ij} E_{i\max}\left(1 - \frac{E_i^2}{E_{i\max}^2}\right)^{n_{ij}} \operatorname{sign} \dot{E}_i,$$

где $S_j$ — относительное перемещение торца пьезопреобразователя; $E_i$ — напряженность электрического поля в пьезопреобразователе; $d_{ij} = S_{j\max}/E_{i\max}$ — пьезомодуль; $E_{i\max}$ — амплитуда напряженности электрического поля, $S_{j\max}$ — максимальное относительное перемещение торца пьезопреобразователя при $E_i = E_{i\max}$;

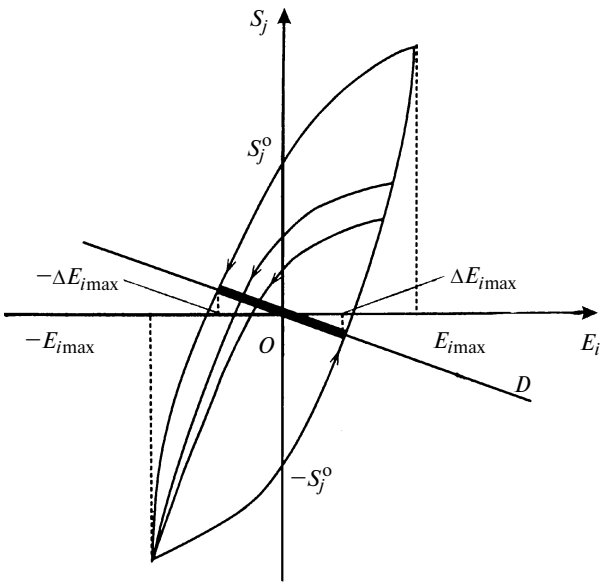



**Рис. 1. Обобщенная знакопеременная гистерезисная характеристика пьезопреобразователя**

$\gamma_{ij} = S_j^0/E_{i\max}$ — коэффициент гистерезиса ($S_j^o$ — остаточная относительная деформация при $E_i = 0$); $n_{ij}$ — степенной коэффициент (для пьезокерамики на основе цирконата и титаната свинца промышленных марок ЦТС или PZT имеем $n_{ij} = 1$); $\dot{E}_i$ — скорость изменения напряженности электрического поля.

С учетом передаточной функции [8, 9] линейной части системы и выражения для основной гистерезисной петли при $n_{ij} = 1$ находим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} y = dx/dt = P(x, y); \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{2\xi_t y}{T_t} - \frac{(1 + kd_{ij})x}{T_t^2} + \frac{(1 + x^2)k\gamma_{ij}}{T_t^2} \operatorname{sign} y = Q(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где $x = E_i/E_{i\max}$, $y$ — координаты; $P(x, y)$, $Q(x, y)$ — аналитические функции на всей фазовой плоскости $xy$.

Для анализа нелинейной системы автоматического управления (рис. 2) воспользуемся критерием Бендиксона [8]: если в некоторой односвязной области на фазовой плоскости выражение $\partial P/\partial x + \partial Q/\partial y$ знакопостоянно, то в этой плоскости не существует замкнутых контуров, целиком составленных из фазовых траекторий динамической системы.

Из системы (1) дифференциальных уравнений получим:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = -\frac{2\xi_t}{T_t} < 0, \text{ если } y \neq 0;$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} > 0, \text{ если } y = 0,$$

т. е. наблюдается изменение знака выражения. Следовательно, можно говорить о возможности возникновения автоколебаний в системе управления деформацией пьезопреобразователя.

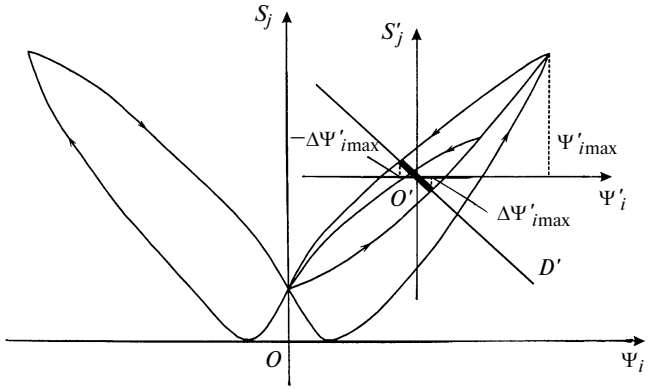



**Рис. 2. Обобщенная типа бабочки гистерезисная знакопостоянная характеристика электрострикционного или магнитострикционного электромагнитоупругого пьезопреобразователя: начальная $\Psi_i OS_j$ и смещенная $\Psi'_i O' S'_j$ системы координат**

Используя полученные аналитические выражения для $y$ и $dy/dt$, запишем уравнение изоклины:

$$y = ax^2 + bx + c;$$

где

$$a = -\frac{k\gamma_{ij}\operatorname{sign} y}{T_t^2\left(\frac{dy}{dx} + \frac{2\xi_t}{T_t}\right)};\ b = -\frac{1 + kd_{ij}}{T_t^2\left(\frac{dy}{dx} + \frac{2\xi_t}{T_t}\right)};$$

$$c = \frac{k\gamma_{ij}\operatorname{sign} y}{T_t^2\left(\frac{dy}{dx} + \frac{2\xi_t}{T_t}\right)}.$$

Полученному уравнению изоклины соответствует фазовый портрет системы автоматического управления деформацией пьезопреобразователя с симметричной зоной покоя шириной $2\Delta$ на оси $X$ или $2\Delta E_{i\max}$ соответственно на оси $E_i$.

Соответственно, из уравнения изоклины получаем уравнение

$$\Delta^2 + \frac{1 + kd_{ij}}{k\gamma_{ij}}\Delta - 1 = 0,$$

из которого определяем ширину зоны покоя

$$2\Delta = -\frac{1 + kd_{ij}}{k\gamma_{ij}} + \sqrt{\frac{(1 + kd_{ij})^2}{k^2\gamma_{ij}^2} + 4},$$

где $\gamma_{ij} = \gamma_{31}, \gamma_{33}, \gamma_{15}$ — соответствующий коэффициент гистерезиса.

Проведенный анализ позволяет сделать выводы о том, что множество положений равновесия на фазовой плоскости системы управления деформацией представляет собой отрезок покоя и что в системе возможны автоколебания.

## Применение метода гармонической линеаризации для нахождения условий возникновения автоколебаний в системе управления

Метод гармонической линеаризации является развитием метода эквивалентной линеаризации Крылова—Боголюбова [7], в котором нелинейный элемент заменяется элементом с линейными свойствами, причем такая замена позволяет сохранить у линеаризованного элемента основное свойство — зависимость наклона его характеристики от амплитуды входного сигнала. Метод практически широко используется для определения показателей динамической точности, качества процессов управления и определения параметров автоколебаний в нелинейных системах управления, для расчета параметров механических и электромеханических систем и оценки их устойчивости.

Метод гармонической линеаризации позволяет найти зависимость между основными характеристиками процессов в системе управления деформацией пьезопреобразователя (амплитудой колебаний и частотой) и параметрами системы (коэффициентами передачи и постоянными времени). Приведем систему управления деформацией пьезопреобразователя к виду замкнутой системы с последовательным соединением гистерезисного элемента и линейной части системы, а для определения параметров автоколебаний воспользуемся частотным критерием Гольдфарба [9]:

$$W_{ij_l}(j\omega) = -\frac{1}{W_{ij_g}(E_{i\max})},$$

где $W_{ij_l}(j\omega)$ — частотная передаточная функция линейной части системы управления деформацией пьезопреобразователя, $j$ (в скобках) — мнимая единица, $\omega$ — круговая частота; $W_{ij_g}(E_{i\max})$ — обобщенная частотная передаточная функция нелинейного звена с гистерезисной характеристикой в виде обобщенного основного гистерезисного цикла.

Соответственно, обобщенная частотная передаточная функция нелинейного гистерезисного звена имеет вид [9]:

$$W_{ij_g}(E_{i\max}) = S_j(E_{i\max})/E_i(E_{i\max}) = \\ = q_{ij}(E_{i\max}) + jq'_{ij}(E_{i\max}),$$

в которой коэффициенты гармонической линеаризации обобщенной основной гистерезисной характеристики [10] для пьезопреобразователя из пьезокерамики марок ЦТС или PZT при $n_{ij} = 1$ записываются в виде:

$$q_{ij}(E_{i\max}) = d_{ij}(E_{i\max}) = d_{ij}^0 + a_{ij}E_{i\max}^2 + b_{ij}E_{i\max}^4;$$

$$q'_{ij}(E_{i\max}) = -\frac{8\gamma_{ij}}{3\pi},$$

где $d_{ij}^0$ — начальный пьезомодуль; $a_{ij}$, $b_{ij}$ — коэффициенты аппроксимации.

После подстановки в частотный критерий Гольдфарба коэффициентов гармонической линеаризации получаем выражение

$$\frac{k}{T_t^2(j\omega)^2 + 2T_t\xi_t j\omega + 1} = -\frac{1}{q_{ij}(E_{i\max}) + jq'_{ij}(E_{i\max})},$$

после преобразований которого получаем выражение

$$\frac{1}{\dfrac{1-T_t^2\omega^2}{k}+j\dfrac{2T_t\xi_t\omega}{k}}=\frac{1}{-(d_{ij}^0+a_{ij}E_{i\max}^2+b_{ij}E_{i\max}^4)+j\dfrac{8\gamma_{ij}}{3\pi}}.$$

Следовательно, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases}\dfrac{2T_t\xi_t\omega}{k}=\dfrac{8\gamma_{ij}}{3\pi};\\[2ex] \dfrac{T_t^2\omega^2-1}{k}=d_{ij}^0+a_{ij}E_{i\max}^2+b_{ij}E_{i\max}^4.\end{cases}\qquad(2)$$

Из первого равенства системы уравнений (2) определяем частоту автоколебаний в системе управления деформацией пьезопреобразователя при упругоинерционной нагрузке: $\omega_a = 4\gamma_{ij}k/(3\pi T_t\xi_t)$.

С учетом частоты автоколебаний из второго уравнения системы (2) определяем амплитуду автоколебаний.

В системе управления деформацией возможно возникновение автоколебаний. Для обеспечения устойчивости и точности систем управления деформацией электромагнитоупругих преобразователей необходимы корректирующие устройства.

### Абсолютная устойчивость системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя

Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя проведем на основании критерия Якубовича [5], являющегося развитием критерия абсолютной устойчивости Попова. При описании системы используем передаточную функцию $W_{ij_l}(p)$ линейной части системы и гистерезисную функцию $S_j$ электромагнитоупругого преобразователя [6].

Описание гистерезисной нелинейности электромагнитоупругого преобразователя в общем виде

$$S_j = F[\Psi_i|_0^t,\ t,\ S_j(0),\ \mathrm{sign}\dot{\Psi}_i]$$

означает, что значение функции $S_j$ в каждый момент времени $t$ зависит от поведения функции $\Psi_i(t) = E_i$, $H_i$, где $E_i$, $H_i$ — напряженности электрического или магнитного поля на промежутке $[0, t]$, от $t$, от начального значения $S_j(0)$ и знака скорости $\dot{\Psi}_i$ изменения напряженности поля. При этом $S_j(0)$ должно принадлежать некоторому дополнительно заданному множеству $L[\Psi_i(0)]$, зависящему в общем случае от $\Psi_i(0)$. Рассмотрим гистерезисную характеристику пьезопреобразователя (см. рис. 1). Множеством $L[E_i(0)]$ является вертикальный отрезок $[S_j^{\mathrm{o}}, -S_j^{\mathrm{o}}]$ между точками пересечения оси ординат с петлей гистерезиса, снятой при максимально допустимой напряженности поля в пьезопреобразователе.

Найдем стационарное множество системы управления деформацией пьезопреобразователя при устойчивой линейной части системы управления. На плоскости $E_iS_j$ проведем прямую $D$, описываемую уравнением $E_i + W_{ij_l}(0)S_j = 0$, где $W_{ij_l}(0)$ — значение передаточной функции линейной части системы управления при $p \to 0$. Множество точек $M$ пересечения этой прямой с гистерезисной характеристикой представляет собой отрезок прямой (выделен на рис. 1).

Пусть $E_{i0}(t) \equiv E_i(0)$, $S_{j0}(t) \equiv S_j(0)$ — стационарное решение системы. Следовательно, получаем: $E_{i0} + W_{ij_l}(0)S_{j0} = 0$.

Таким образом, стационарным множеством $M$ системы будет выделенный отрезок прямой $D$ с множеством пар $(E_{i0}, S_{j0})$. Каждой точке пересечения гистерезисной нелинейности с частными циклами и прямой $D$ соответствует одно положение равновесия с координатами $E_{i0}$, $S_{j0}$.

Функция $S_j(t)$ гистерезисной нелинейности пьезопреобразователя непрерывна, причем $\nu_{1ij}, \nu_{2ij} \in [0, \nu_{ij}]$; $\nu_{ij} = \max[dS_j/dE_i]$.

Величины $\nu_{1ij}$ и $\nu_{2ij}$ определяем по гистерезисной статической характеристике (см. рис. 1), измеренной при максимально допустимой напряженности электрического поля в пьезопреобразователе, где $\nu_{1ij} = 0$ и $\nu_{2ij} = \nu_{ij}$ — соответственно минимальное и максимальное значения тангенса угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности пьезопреобразователя. Следовательно, отношение тангенсов угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности пьезопреобразователя при продольном, поперечном или сдвиговом пьезоэффектов пропорционально отношению соответствующих пьезомодулей: $\nu_{31}:\nu_{33}:\nu_{15} = d_{31}:d_{33}:d_{15}$.

Характеристики электромагнитоупругих пьезопреобразователей являются знакопеременными (см. рис. 1) — типа гистерезиса, а электрострикционных или магнитострикционных преобразователей — знакопостоянными (см. рис. 2) — типа бабочки [11, 12], для которых начальная рабочая точка выбирается на одном "крыле бабочки", например в первом квадранте, чтобы диапазон деформаций в обе стороны от начальной точки был симметричен. Величины тангенсов угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности на "крыле бабочки" (см. рис. 2) для электромагнитоупругого преобразователя при выборе смещенной на половину диапазона деформации начальной рабочей точки определяются,

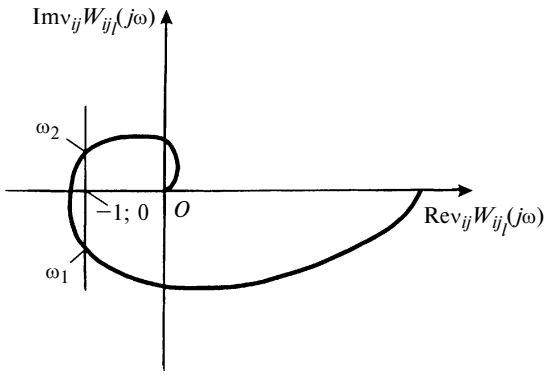



**Рис. 3. Критерий абсолютной устойчивости системы управления электромагнитоупругим преобразователем на плоскости**

как и для гистерезисной характеристики (см. рис. 1). Стационарным множеством системы на рис. 2 является выделенный отрезок прямой $D'$. Тогда достаточные условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя (рис. 3) имеют вид: $\mathrm{Re}\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega) \geqslant -1$, где $j$ (в скобках) — мнимая единица; $\omega$ — частота.

Частотный критерий абсолютной устойчивости прост и удобен для синтеза корректирующих устройств [9] системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя. Для пьезопреобразователя из пьезокерамики промышленных марок ЦТС или PZT величина максимального значения тангенса угла наклона касательной к гистерезисной нелинейности при продольном пьезоэффекте составляет порядка 1 нм/В, а при поперечном пьезоэффекте — порядка 0,6 нм/В.

## Условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя при случайных воздействиях

Исследование абсолютной устойчивости системы автоматического управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя при случайных воздействиях проведем на основании критерия Якубовича [4—6].

Критерий для системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя с гистерезисной характеристикой (см. рис. 1 и 2) имеет формулировку: для того чтобы нелинейная система автоматического управления с внешним воздействием, содержащим случайную составляющую $f(t) = m_f(t) + f^0(t)$, причем $|m_f(t)| \leqslant R_f$ ($R_f$ — верхняя оценка модуля математического ожидания $m_f$), была абсолютно устойчивой относительно математических ожиданий, достаточно, чтобы при всех $\omega \geqslant 0$ выполнялось условие $\mathrm{Re}\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega) + 1 \geqslant 0$ и производная нелинейной характеристики удовлетворяла неравенству

$$0 < \frac{\partial m_{S_j}(m_{\Psi_i}, \sigma_{\Psi_i})}{\partial m_{\Psi_i}} < \nu_{ij}. \qquad (3)$$

Дисперсию $\sigma^2_{\Psi_i}$ можно оценить посредством дисперсии внешнего воздействия, т. е. $\sigma^2_{\Psi_i} \leqslant k^2_\sigma \sigma^2_f$, где $k_\sigma$ — взаимная корреляционная функция $f$ и $\Psi_i$. Если среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Psi_i}$ заменить его верхним значением, то неравенство (3) можно переписать в виде:

$$0 < \frac{\partial m_{S_j}(m_{\Psi_i}, k_\sigma \sigma_f)}{\partial m_{\Psi_i}} < \nu_{ij},$$

где производная нелинейной характеристики

$$\frac{\partial m_{S_j}}{\partial m_{\Psi_i}} = \frac{1}{2\sigma^2_{\Psi_i}} \int_{-\infty}^{+\infty} (\Psi_i - m_{\Psi_i}) \Big[ S_j^+(\Psi_i) + S_j^-(\Psi_i) \Big] \frac{1}{\sigma_{\Psi_i}\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(\Psi_i - m_{\Psi_i})^2}{2\sigma^2_{\Psi_i}}} d\Psi_i,$$

Здесь $S_j^+(\Psi_i)$, $S_j^-(\Psi_i)$ — верхняя и нижняя кривые гистерезисной петли.

Для пьезопреобразователя вершины основных гистерезисных петель находятся на начальной кривой $S_j = F_1(E_i)$, причем $S_{j\max} = d_{ij\max} E_{i\max}$, где $d_{ij\max}$ — максимальное значение продольного пьезомодуля для каждой основной гистерезисной кривой пьезопреобразователя. Следовательно, выражение для производной нелинейной характеристики преобразуется к виду:

$$\frac{\partial m_{S_j}}{\partial m_{E_i}} = \frac{1}{\sigma^2_{E_i}} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_i - m_{E_i}) F_1(E_i) \frac{1}{\sigma_{E_i}\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(E_i - m_{E_i})^2}{2\sigma^2_{E_i}}} dE_i.$$

Начальная кривая пьезопреобразователя при обратном пьезоэффекте

$$F_1(E_i) = d^0_{ij} E_i + a_{ij} E_i^3 + b_{ij} E_i^5,$$

причем максимальное значение пьезомодуля имеет вид:

$$d_{ij\max} = d^0_{ij} + a_{ij} E^2_{i\max} + b_{ij} E^4_{i\max},$$

где $d^0_{ij}$ — начальное значение пьезомодуля; $a_{ij}$ и $b_{ij}$ — коэффициенты степенного полинома.

Для пьезопреобразователей из пьезокерамики ЦТС-19 при продольном пьезоэффекте имеем следующие значения: $d^0_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В; $a_{33} = 3{,}1 \cdot 10^{-22}$ м$^3$/В$^3$; $b_{33} = -5 \cdot 10^{-35}$ м$^5$/В$^5$.

Следовательно, получаем производную нелинейной характеристики в виде:

$$\frac{\partial m_{S_j}}{\partial m_{E_i}} = \frac{1}{\sigma^2_{E_i}} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_i - m_{E_i}) d_{ij\max} E_i \frac{1}{\sigma_{E_i}\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(E_i - m_{E_i})^2}{2\sigma^2_{E_i}}} dE_i.$$

Используя метод статистической линеаризации, оценим величину частной производной относительного перемещения по напряженности электрического поля при $m_{E_i} = 0$:

$$\frac{\partial m_{S_j}}{\partial m_{E_i}} = \frac{1}{\sigma^2_{E_i}} \int_{-\infty}^{+\infty} d_{ij\max} E_i^2 \frac{1}{\sigma_{E_i}\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{E_i^2}{2\sigma^2_{E_i}}} \mathrm{d}E_i = d_{ij\max};$$

$$0 < d_{ij\max} < \nu_{ij}.$$

Рассмотрим геометрическую интерпретацию критерия абсолютной устойчивости. Амплитудно-фазовая характеристика $\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega)$ разомкнутой системы должна быть для всех $\omega \geqslant 0$ расположена правее прямой $\mathrm{Re}\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega) = -1$ (см. рис. 3). Критерий абсолютной устойчивости системы [4, 6, 9] на плоскости логарифмической амплитудной частотной характеристики и фазовой частотной характеристики $\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega)$ разомкнутой системы в декартовой системе координат: $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)]$ (где $L(\omega) = 20\lg|\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega)|$ — логарифмическая амплитудная частотная характеристика; $\varphi(\omega)$ — фазовая частотная характеристика), формулируется

следующим образом: для абсолютной устойчивости системы достаточно, чтобы логарифмическая амплитудная частотная характеристика $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)]$ разомкнутой системы управления электромагнитоупругим преобразователем для всех $\omega \geqslant 0$ располагалась ниже граничной кривой $L(\omega) = 20\lg|1/\cos\varphi|$, которая является отображением на данной плоскости прямой $\mathrm{Re}\nu_{ij} W_{ij_l}(j\omega) = -1$ (см. рис. 3). Следовательно, при введении в систему корректирующего устройства, надлежащим образом деформирующего амплитудную частотную характеристику линейной части системы, частотный критерий абсолютной устойчивости будет выполняться.

### Заключение

Полученные условия абсолютной устойчивости системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя позволяют оценить устойчивость и определить характеристики системы управления деформацией электромагнитоупругого преобразователя и корректирующуго устройства системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Афонин С. М.** Пьезопреобразователи для приводов микроперемещений // Приборы и системы управления. 1998. № 2. С. 41, 42.
2. **Физическая** акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
3. **Афонин С. М.** Структурно-параметрическая модель пьезодвигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2001. № 5. С. 29—33.
4. **Наумов Б. Н.** Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.
5. **Баранов Н. Е., Якубович В. А.** Абсолютная устойчивость систем регулирования с одной гистерезисной нелинейностью // Автоматика и телемеханика. 1979. № 12. С. 5—12.
6. **Афонин С. М.** Об абсолютной устойчивости системы управления пьезодвигателем наноперемещений // Вестник машиностроения. 2001. № 8. С. 19—22.
7. **Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н.** Введение в нелинейную механику. Киев: АН УССР, 1937. 364 с.
8. **Андронов А. А., Вит А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 915 с.
9. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
10. **Афонин С. М.** Применение метода гармонической линеаризации в расчетах систем автоматического управления пьезодвигателями наноперемещений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 4. С. 35—36.
11. **Перспективы** применения электрострикционных материалов / А. Е. Панич, В. Г. Смотраков, В. В. Еремкин, Ю. А. Вусевкер. // Микросистемная техника. 2002. № 2. С. 21—24.
12. **Ультразвуковые** преобразователи / Под ред. Е. Кикучи. М.: Мир, 1972. 424 с.


---

УДК 621.3.07

С. О. НИКИФОРОВ, д-р техн. наук,
Б. Е. МАРХАДАЕВ, Э. Б. МАНДАРОВ, кандидаты технических наук,
(СО РАН, г. Улан-Удэ)

# Быстродействующие циклоидальные манипуляторы с пространственным движением рабочего органа

Предлагаются способы реализации компоновочных структур быстродействующих циклоидальных манипуляторов с пространственным движением рабочего органа.

Теория циклоидальных манипуляторов (ЦМ) разрабатывалась исключительно для механизмов, работающих в плоскости [1—5]. Основное требование к траекториям рабочих органов (РО) таких ЦМ — они должны содержать точки мгновенной остановки, используемые в качестве точек позиционирования. Однако при переносе объектов манипулирования нередко требуется выход РО из плоскости [6]. Этого можно добиться двумя способами:

выходом из плоскости с помощью самостоятельного привода и механизма малых перемещений (двигатели механизма малых перемещений могут быть электромагнитными);

выходом из плоскости с помощью основного привода с дополнительным механизмом, при этом дополнительно задается вращение вокруг оси, не параллельной осям вращения двух первых звеньев (может использоваться коническая передача от основного привода или самостоятельный синхронизированный с ним двигатель).

### Двухзвенный пространственный механизм

При выборе новых схем остается принцип формирования траекторий, при котором для воспроизводимых движений по траекториям получают точки мгновенной остановки [1—3]. Механизм должен быть достаточно простым, поэтому рассматривают только схемы с двумя или тремя степенями свободы.

Для двухзвенных шарнирно-рычажных механизмов ЦМ целесообразно задавать различные ориентации осей кинематических пар. К таким схемам относятся схемы с параллельными или взаимно перпендикулярными осями вращения и с наклонными осями.

Для получения точек мгновенной остановки вторая ось должна быть направлена или вертикально, или вдоль оси первого звена. В первом случае получают обычный плоский циклоидальный механизм, который широко распространен в робототехнике. Базовая схема дополняется поступательной кинематической парой вертикального перемещения (соответствующая кинематическая пара становится первой в кинематической цепи; в буквенно-цифровой

системе обозначения получаем формулу 1Пz2Bz3Bz) и механизмом ориентирования вокруг вертикальной оси (последняя пара в кинематической цепи) и превращается в схему промышленного робота типа SCARA, которые не ориентированы на работу при постоянных угловых скоростях как ЦМ, содержат управляемый электропривод и контурную систему ЧПУ. Промышленные роботы (ПР) типа SCARA более совершенны, чем ЦМ, являются прецизионными и дорогостоящими. Некоторые принципиальные и конструктивные решения для модулей вращения можно использовать и в ЦМ.

Основными недостатками базовой схемы ЦМ (рис. 1, *а*) являются [2—4]: невозможность варьирования формы траектории; трудность задания желаемых законов переориентирования переносимого объекта.

Рассмотрим простую схему ЦМ (рис. 1, *б*), воспроизводящую пространственную траекторию. Данный механизм имеет две степени свободы при независимых приводах двух звеньев (предполагается, что первая ось вращения — вертикальная, вторая — горизонтальная и направлена вдоль оси первого звена). Подобные манипуляторы применимы не только для вспомогательных операций, но могут использоваться и для некоторых технологических операций, например для точечной сварки, в пищевой промышленности для дозированной загрузки продукта в тару.

Траектории концевых точек *B* механизмов не являются плоскими циклоидальными кривыми: они лежат на цилиндрической поверхности с вертикальной осью. Такой манипулятор нельзя назвать циклоидальным, однако в силу традиции это название сохранено.

Эти траектории, как и плоские циклоидальные кривые — траектории механизма, схема которого представлена на рис. 1, *а*, могут быть петлеобразными, волнообразными или иметь точки возврата, в которых происходит мгновенная остановка рабочего органа ЦМ.

Траектории концевых точек пространственного механизма показаны на рис. 2.

В задачах манипулирования с захватыванием объекта с неподвижного основания и (или) с установкой на неподвижное основание обязательно используют траектории с точками возврата (точками мгновенной остановки). Для точек возврата $M_1$ и $M_2$ должно выполняться условие: $\varphi_1 l_1 = \varphi_2 l_2$. Если отношение $\varphi_2/\varphi_1 = l_1/l_2 = k$ — целое число, то траектория представляет собой замкнутую линию. Замыкание происходит на каждом обороте вокруг оси. Вертикальное смещение второго звена на эти условия не влияет. В зависимости от направления вращения второго звена точки возврата находятся на верхнем или нижнем основании цилиндрической поверхности. При этом число точек возврата равно $k$ (для плоского циклоидального механизма отношение приращений углов также равно числу точек возврата, но соотношение длин звеньев должно быть иным).

Введем прямоугольную систему координат: ось $X$ расположена горизонтально, начинается от главной оси из точки на нижнем основании цилиндрической поверхности и направлена радиально в точку возврата, которая считается первой; ось $Z$ располагается вертикально.

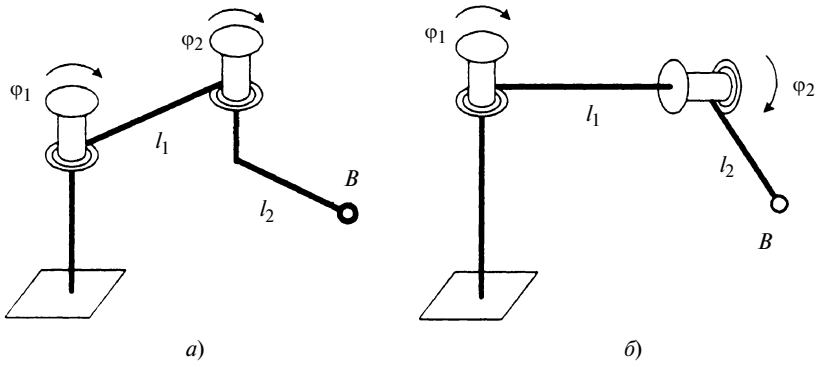



**Рис. 1. Схемы двухзвенных ЦМ:**
*а* — плоский; *б* — пространственный; $l_1$, $l_2$ — длины соответствующих звеньев

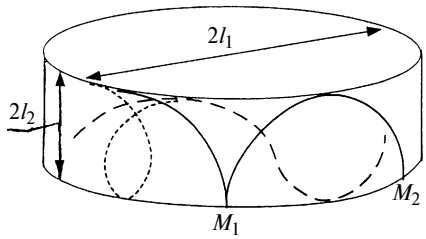



**Рис. 2. Траектории конечных точек пространственного механизма**

Для механизма, схема которого показана на рис. 1, *б*, координаты концевой точки *B*:

$$X = l_1\cos\varphi_1 - l_2\sin\varphi_2\sin\varphi_1;$$

$$Y = l_1\sin\varphi_1 + l_2\sin\varphi_2\cos\varphi_1;$$

$$Z = l_2(1 - \cos\varphi_2).$$

Особый интерес представляют смещения точек траектории относительно цилиндрической поверхности радиусом $l_1$. Точки мгновенной остановки и противоположные им точки, соответствующие значениям $\varphi_2 = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, ..., k$, лежат на цилиндрической поверхности, а в промежуточных точках, соответствующих значениям $\varphi_2 = (n + 1/2)\pi$, имеет место максимальное радиальное отклонение, равное $\Delta R = \sqrt{X^2 + Y^2} - l_1$.

При задаваемых значениях $k$, например 3, 4 и т. д., при приблизительной оценке $\Delta R \approx l_2^2/(2l_1) = l_1/(2k^2)$. Отсюда следует, что чем больше точек мгновенной остановки, тем меньше отклонений от цилиндрической поверхности. Эти отклонения малы, при $k > 3$ они не превышают 5 %.

При анализе возможностей применения рассматриваемого циклоидального манипулятора можно провести аналогию с традиционными обслуживающими ПР.

На рис. 3, *а* изображена типовая траектория рабочего органа робота, рука которого имеет постоянную длину и две степени свободы: поступательное движение и вращательное; формула схемы 1Пz2Bz или 1Bz2Пz.

В точках $M_1$, $M_2$, $M_3$, находящихся на одном уровне, осуществляется захват или освобождение объекта, а перенос — на более высоком уровне. Число точек мгновенной остановки

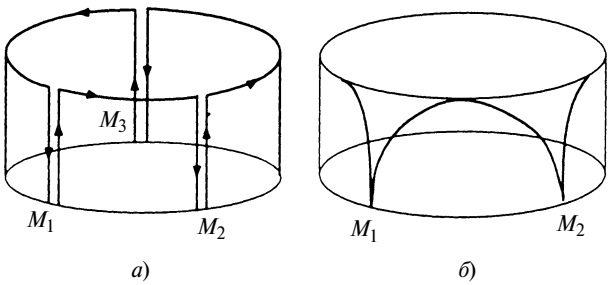



**Рис. 3. Схемы траекторий конечных точек:**
*а* — схвата ПР; *б* — РО ЦМ

выбирают по требованию, но они должны находиться на окружности с центром на главной оси. Такая траектория типична для случая, когда расстановка оборудования приспособлена под геометрию ПР, а именно: все точки позиционирования располагаются на окружности с центром на главной оси ПР. В этом случае для переноса на верхнем уровне с постоянным вылетом руки нет препятствий (нет необходимости втягивать руку).

Важно, что касательные к траекториям в точках мгновенной остановки вертикальны, что часто требуется при программировании ПР в тех случаях, когда переносимый объект должен устанавливаться на горизонтальную плоскость.

Типовая траектория движения РО ЦМ, выполненного по схеме, показанной на рис. 1, *б*, представлена на рис. 2 сплошной линией. В точках $M_1$ и $M_2$ могут осуществляться захватывание или отпускание объекта или быстрые специальные технологические операции. Для свободного переноса выполняется подъем на верхний уровень.

Траектории, изображенные на рис. 3, *а* и *б*, имеют некоторое сходство, но есть и отличия: точки $M_1$, $M_2$, $M_3$ не только лежат на одной окружности, но и расположены на ней равномерно. Кроме того, разложив в степенной ряд координаты точки $B$ по углу $\varphi$ в окрестности точек возврата и линеаризируя его, получим $\Delta X = 1/2 l_1 \varphi^2$; $\Delta Z = 1/2 k l_1 \varphi^2$; $\Delta Y = (1 + 1/2k^2) l_1 \varphi^3$. Перемещения по осям $X$ и $Z$ — второго порядка, а по оси $Y$ — третьего порядка.

Вблизи точки возврата перемещение объекта происходит по наклонной прямой, лежащей в вертикальной плоскости с коэффициентом $k$ наклона. Отклонение от вертикального направления начального участка при подъеме объекта может быть несущественным. Но если это недопустимо, необходимо задавать другое, не горизонтальное, а наклонное направление оси второй кинематической пары. Этот случай рассмотрен ниже.

## Кинематические характеристики двухзвенного пространственного механизма

Как и для обычного ЦМ, требуемые соотношения углов поворота звеньев и соответствующих угловых скоростей звеньев можно обеспечить двумя способами: с помощью механической передачи (привод от одного и того же двигателя) или с помощью их синхронизации (два двигателя). Во втором случае недостаточно стабилизировать требуемое отношение угловых скоростей — необходимо точное фазовое согласование по углам.

Приведем кинематические характеристики движения по траектории в предположении равномерного вращения по обоим углам: $\varphi(t) = \omega t$; $\varphi_2(t) = k\omega t$.

Для проекций вектора линейной скорости концевой точки $B$ имеем:

$$V_X = -l_2\omega(k\sin\varphi_1 + k\sin\varphi_1\cos k\varphi_1 + \cos\varphi_1\sin k\varphi_1);$$

$$V_Y = l_2\omega(k\cos\varphi_1 + k\cos\varphi_1\cos k\varphi_1 - \sin\varphi_1\sin k\varphi_1);$$

$$V_Z = l_2 k\omega\sin k\varphi_1.$$

Тогда модуль вектора скорости

$$V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2} = \omega l_2[\sin^2 k\varphi_1 + 2k^2(1 - \cos k\varphi_1)]^{1/2}.$$

Видно, что при угле $\varphi_1$, кратном $2\pi$, скорость $V = 0$, что соответствует мгновенной остановке.

Очевидно, что кинематические зависимости при воспроизведении рассматриваемой пространственной кривой сходны по качеству с соответствующими зависимостями, воспроизводимыми плоскими ЦМ.

## Модернизированный циклоидальный механизм для воспроизведения пространственных траекторий РО

Взаимная ортогональность двух осей поворота звеньев двухзвенного манипулятора для получения пространственных траекторий является обязательной. Ось вращения второго звена сделаем наклонной и направим ее под углом $\beta$ к оси первого звена или (что то же самое) к горизонтальной плоскости (рис. 4). Тогда траектории концевой точки будет находиться на конической поверхности, а не на цилиндрической.

Задавая определенный наклон второй оси, можно достичь трех целей:

1) получить участок вертикального перемещения вблизи точки мгновенной остановки и устранить соответствующий недостаток исходной схемы (см. рис. 1, *б*);

2) установить переносимый объект на наклонную плоскость или ввести в гнездо с наклонной осью;

3) так как последнее звено несет два захватных устройства, целесообразно использовать ориентацию под углом 45°. Это применяется в конструкциях, обслуживающих ПР [3], и позволяет за один ход переносить различные заготовки или на рабочем месте заменять обработанную деталь на необработанную заготовку.

Во всех случаях касательные к траектории в точках мгновенной остановки будут наклонными с углом $\beta$ наклона относительно горизонталь-

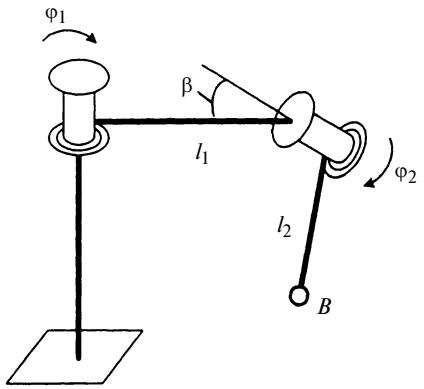



**Рис. 4. Схема ЦМ с наклонной осью второго звена**

ной плоскости. При определенных значениях углов поворота, угловых скоростей и длин звеньев траектории концевых точек будут замкнутыми, с точками мгновенной остановки.

Первое условие замыкания траектории (после условия, что $k$ — целое число) — $\varphi_2/\varphi_1 = k$, что совпадает с аналогичным условием для других схем ЦМ.

Траектория концевой точки лежит на конусной поверхности. Данная схема манипулятора имеет недостатки:

1) при заданном вылете руки невозможно изменение каких-либо параметров траектории, в частности нельзя существенно уменьшить минимальное расстояние до главной оси;

2) при жестком креплении захватного устройства к третьему звену в процессе движения имеет место сложное угловое переориентирование переносимого объекта, что при больших размерах объекта, как правило, нежелательно.

Эти недостатки можно устранить путем добавления шарниров и поворотных звеньев.

Выводы

Двухзвенный ЦМ с взаимно перпендикулярными осями кинематических пар воспроизводит пространственные траектории переноса на верхнем уровне с точками мгновенной остановки на нижнем уровне и тем самым имитирует типичные движения переноса с опусканием перед захватыванием объекта и последующим подъемом.

Полученные соотношения длин звеньев, их углов поворота и угловых скоростей определяют условия замыкания траекторий и заданное число точек мгновенной остановки.

Преимущества двухзвенного манипулятора с непараллельными осями кинематических пар обеспечивает задание угла наклона оси второй кинематической пары относительно горизонтальной плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Никифоров С. О.** К методике расчета шарнирных циклоидальных манипуляторов // Вестник машиностроения. 1987. № 3. С. 5—7.
2. **Никифоров С. О., Мархадаев Б. Е.** Идентификация и выбор компоновочных структур быстродействующих циклоидальных манипуляторов // Вестник машиностроения. 1990. № 10. С. 43—45.
3. **Никифоров С. О.** Циклоидальные манипуляторы: новые схемы, механика, управление, применение // Вестник машиностроения. 2002. № 6. С. 3—8.
4. **Челпанов И. Б.** Устройство промышленных роботов. Ленинград: Машиностроение, 1990. 223 с.
5. **Никифоров С. О., Челпанов И. Б., Слепнев В. В.** Быстродействующие циклоидальные манипуляторы. Монография. Улан-Удэ: БИЕН СО РАН, 1996. 111 с.
6. **Никифоров С. О., Павлов А. Н.** Требования к перемещениям объектов манипулирования и способа реализации устройств для их перемещений // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 3—8.


---

УДК 531.43:532

В. Ц. ВАНЧИКОВ, канд. техн. наук (Иркутский ГУПС)

# Контактные силы в узлах трения машин

Рассматриваются контактные силы, возникающие в поверхностных слоях твердого тела и смазочной жидкости, при их перемещении относительно друг друга.

Многие технические задачи могут быть разрешены в результате детального рассмотрения механизма действия контактных сил. К контактным силам относятся: сила упругости; сила сопротивления вязкой среды движению твердого тела; силы, возникающие между трущимися поверхностями твердых тел. По своей природе это электромагнитные силы, обусловленные взаимодействием между заряженными микрочастицами, входящими в состав макроскопических тел [1]. При рассмотрении силового взаимодействия жидкости с твердым телом в гидромеханике согласно гипотезе о сплошности среды реальные дискретные объекты молекулярного строения веществ заменяют упрощенными моделями, представляющими собой материальный континуум [2].

Считалось, что нескомпенсированное адгезионное поле молекул поверхности твердого тела располагается в пределах молекулярного воздействия, в радиусе порядка 0,001 мкм. Поэтому предполагалось, что толщина пристеночного слоя жидкости, участвующей в течении, — микроскопической величины. Облитерация водой капиллярных трубок диаметром 200 мкм и более опровергает такое представление [3]. Для объяснения этого при оценке толщины пристеночного слоя жидкости необходимо развить модель адгезионного взаимодействия, учитывающую микроструктуру соприкасающихся поверхностей твердого тела и жидкости. Поэтому рассмотрим контактные силы с учетом молекулярного строения тел.

Классическая теория течения ньютоновских жидкостей в пристеночном (пограничном) слое лучше всего изложена в работе Г. Шлихтинга [4], которая основана на упрощенных уравнениях Навье-Стокса. При этом не рассматриваются силы адгезии твердого тела и жидкости, тесно связанные с геометрическими параметрами молекулярного строения этих тел. Жидкости вблизи поверхности твердых тел под действием сил адгезии приобретают более упорядоченную молекулярную структуру, о чем свидетельствует необходимость в некотором начальном усилии для осуществления сдвига в пристеночном слое.

Предположим, что ключ к пониманию облитерационного явления в капиллярах, характеризуемого когезией частиц потока жидкости к частицам на "поверхности" пристеночного слоя жидкости и рассматриваемого в работе [3] как особый режим ламинарного течения,

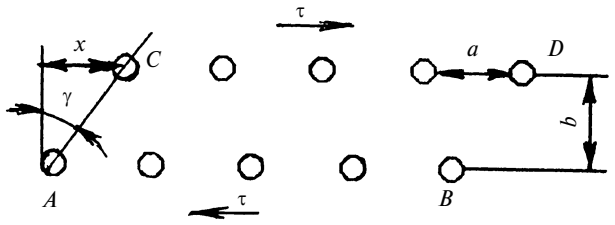
может дать теория перколяции. Эта теория рассматривает образование связанных объектов в неупорядоченных средах. Можно предположить, что имеется аналогия особого режима ламинарного течения жидкости с некоторыми перколяционными процессами. Примером может служить электрический пробой сложной системы, состоящей из проводящих и непроводящих материалов. При определенном количестве металлических шариков, примерно 16 % от всего объема, происходит электрический пробой системы, представляющей собой смесь плотно упакованных хаотично расположенных металлических и диэлектрических шариков одинакового размера. Таким образом, если металлические шарики составляют объем меньше 16 % системы, то электрический ток не проходит и система является изолятором. Однако если металлических шариков достаточно для прохождения электрического тока, то система является проводником.

Количественная оценка порога мгновенного преобразования изолятора в проводник (порядка 10 ÷ 15 %), найденная при решении задачи твердых сфер, соблюдается и для объемных решеток. Физические свойства кристаллов определяются геометрическими параметрами кристаллических решеток. Таким образом, предположим, что в случае облитерации взаимосвязь между гидромеханическими явлениями в пристеночном слое жидкости и геометрическими параметрами молекулярного строения поверхности твердого тела можно проследить в рамках теории перколяции [5]. При особом режиме ламинарного течения жидкости (при облитерации капилляра) характер сил межмолекулярного взаимодействия можно выяснить на примере изолированной молекулы пристеночного слоя жидкости, обездвиженного силами адгезии поверхности твердого тела, и молекулы текущей жидкости. При некотором расстоянии сила взаимодействия между ними равна нулю, т. е. силы притяжения и отталкивания уравновешены. Пространства, занимаемые молекулой пристеночного слоя жидкости и молекулой текущей жидкости, заменим моделью, представляющей собой некоторый объем, заполненный упругими сферами. Тогда по аналогии можно применить решение задачи твердых сфер из теории перколяции для представления когезионного взаимодействия молекул на поверхности пристеночного слоя жидкости с молекулами, протекающих сквозь капилляр.

### Силы упругости

Я. И. Френкель определил силу, необходимую для сдвига одной части кристалла относительно другой [3]. Оказалось, что для осуществления сдвига достаточно приложить силу в 100 раз меньшую, чем определяет теория, основанная на представлении о сдвиге, который происходит одновременно по всей плоскости.

Для того чтобы разобраться в этом, рассмотрим деформацию кристалла под действием касательных напряжений $\tau$ (см. рисунок). Предположим, что кристалл — идеальный. Под действием напряжения $\tau$ слой $CD$ решетки сместится относительно слоя $AB$ на расстояние $x$. Потенциальная энергия $U(x)$ решетки будет периодической функцией смещения $x$ с периодом $a$, равным постоянному размеру решетки в направлении смещения. Потенциальная энергия решетки будет иметь минимальное значение при $x$, равном 0, $a$, $2a$ и т. д., а максимальное значение — при $a/2$, $3a/2$, $5a/2$ и т. д. Если после смещения слоев на расстояние $x < a/2$ снять напряжение, то решетка вернется в исходное состояние, т. е. деформация будет упругой. При постоянном действии $\tau$ осуществляются переходы в следующие положения устойчивого равновесия: $x = a$, $x = 2a$ и т. д. Таким образом, предел упругости или предел текучести кристалла $x = a/2$. Для оценки предела упругости $\tau_y$ Я. И. Френкель предположил, что функция $U(x)$ имеет синусоидальный характер: $U(x) = U_n(1 - \cos 2\pi x/a)$.




Если площадь грани со стороной $AB$ принять за единицу, то приложенное напряжение будет:

$$\tau = dU/dx = (2\pi U_n/a)\sin 2\pi x/a. \quad (1)$$

Тогда предел упругости $\tau_y = 2\pi U_n/a$, следовательно, выражение (1) можно записать как $\tau = \tau_y \sin 2\pi x/a$.

При малых значениях $x$ имеем $\tau = 2\pi\tau_y x/a$. С другой стороны, $\tau = G_\gamma$, где $G$ — модуль сдвига; $\gamma$ — угол сдвига. Учитывая, что $\gamma = x/b$, получим $\tau_y = Ga/2\pi b$. Для кристаллов с кубической решеткой ($a = b$) $\tau_y = G/2\pi$. Отсюда получим оценку сдвиговой прочности $G_c$ по Френкелю для идеального кристалла:

$$G_c = G/2\pi. \quad (2)$$

Таким образом, Фенкель предположил, что необходимо преодолевать упругое сопротивление, величина которого при деформации периодически изменяется, повторяясь на межузловом расстоянии решетки кристалла. Поэтому прочность на сдвиг намного меньше модуля сдвига, рассчитанного в предположении, что сдвиг происходит одновременно по всей плоскости. Выражение (2) можно представить как $G/G_c = 2\pi$.

Однако в объеме при микроскопическом удалении от поверхности твердого тела наблюдается особый режим ламинарного течения жидкости при условии, что $\mathrm{Re} = 2\pi$ или $\mathrm{Re} = \rho l v/\eta = \rho v^2/(F_\eta/S)$, где Re — число Рейнольдса; $\rho$ — плотность жидкости; $l$ — характерный размер; $v$ — скорость жидкости; $\eta$ — динамическая вязкость (причем $\eta = \{F_\eta/S\}/\{v/l\}$, здесь $F_\eta$ — сила, параллельная поверхности сдвиговой деформации, площадь которой равна $S$; $v/l$ — скорость изменения сдвиговой деформации по нормали к поверхности твердого тела); $\rho v^2$ — динамическое давление потока жидкости, т. е. внешнее усилие сдвига на пристенный слой жидкости.

Определим предел текучести неподвижного пристенного слоя, обездвиженного силой адгезии твердого тела: $G/G_c = \rho v^2/(F_\eta/S) = 2\pi$.

Таким образом, в объеме при микроскопическом удалении от поверхности твердого тела в условиях особого режима ламинарного течения жидкости сдвиговое напряжение $F_\eta/S$, возникающее в неподвижном пристеночном слое, определяется кристаллической структурой расположения микрочастиц твердого тела.

### Силы трения в смазочном слое

Увеличение сдвиговой прочности неподвижных пристеночных слоев жидкости при увеличении гидродинамического давления потока жидкости [3] позволяет ввести гипотезу о том, что из этих слоев образуется так называемый масляный клин с достаточной сдвиговой прочностью для того, чтобы препятствовать выдавливанию смазочного материала из зоны трения узлов. Ориентирование микрочастиц смазочного материала (упорядочивание молекулярной структуры) на границе неподвижного пристеночного слоя в направлении перемещения узлов машин обеспечивает легкость скольжения. Следовательно, многие трибологические проблемы можно решить, исследуя механизм упорядочивания молекул смазочного материала при их ориентации в направлении перемещения трущихся поверхностей твердых тел. Гидродинамический эффект, состоящий в способности масляного клина создавать подъемную силу, препятствующую полному выдавливанию смазочного материала из зоны трения под действием внешних сил, описан в работе [3] формулой

$$G_\xi = (G/2\pi + P) \approx (C_\xi G + P), \qquad (3)$$

где $G_\xi$ — сдвиговая прочность неподвижного пристеночного слоя смазочного материала; $G$ — модуль сдвига; $C_\xi = 1/2\pi$; $P$ — гидродинамическое давление смазочного материала в узлах трения. То есть гидродинамический эффект масляного клина обусловлен способностью жидкой пленки вблизи поверхности твердых тел изменять сдвиговую прочность. При этом упрочнение молекулярной структуры пристеночного слоя жидкости является следствием упорядочивания микрочастиц пристеночного слоя жидкости при наложении на нее ориентирующего (притирающего) воздействия составляющей силы гидродинамического давления потока жидких частиц, возникающего в смазочном материале в направлении перемещения узлов машин, и одновременного закрепления в этом положении молекул неподвижного пристеночного слоя жидкости силами адгезии твердого тела.

Подтверждение правомерности использования формулы (3) можно найти в законе Амонтона—Кулона: $F = fP_n + A$, где $A$ — сила сопротивления сцеплению, зависящая от площади касания.

В нашем случае при неподвижном пристеночном слое смазочного материала величину силы А можно рассматривать как $P = F_\eta/S$, учитывая гипотезу о влиянии внутреннего трения на величину нормальных напряжений и гипотезу о гидродинамическом давлении, приведенных в работе [2]); $fP_n$ — сила зацепления, пропорциональна нагрузке (ее можно рассматривать как $C_\xi G$); $F$ — сила трения, соответствует $G_\xi$.

Очевидно, что выражение (2) или показатель $C_\xi G$ из формулы (3) характеризуют способность кристалла или пристеночного слоя жидкости сопротивляться напряжениям, вызывающим деформацию сдвига. Чем больше $G$, тем труднее сдвинуть одну часть кристалла или пристеночного слоя относительно другой части. При этом можно предположить, что $C_\xi$ количественно отражает кооперативное когезионное взаимодействие молекул единицы площади сдвига.

В работе [3] показано, что при особом режиме ламинарного течения жидкости $\mathrm{Re} = F_i/F_\eta = 2\pi$, где $F_i$ — сила инерции потока жидкости; $F_\eta$ — сила вязкости. Следовательно,

$$F_\eta = C_\xi F_i. \qquad (4)$$

Анализ уравнения (4) показал, что особый режим ламинарного течения жидкости вблизи поверхности твердого тела (облитерация капилляров) аналогичен сдвиговой деформации кристаллов.

### Значение параметра $C_\xi$ в описании контактных сил

Выражение (2) можно представить в виде:

$$G_c \approx 0{,}16G. \qquad (5)$$

Кроме того, можно заметить определенное сходство некоторых параметров, характеризующих движение жидкости вблизи поверхности твердого тела, с выражением (5). Например, максимальная сила давления в плоском смазочном клине определяется формулой $F_{\max} = 0{,}16\eta v(L^2/z^2)$, где $\eta$ — динамическая вязкость; $v$ — скорость движения тела; $L$ — длина смазочного клина; $z$ — зазор между телами [2].

При движении жидкости в трубке тормозящее воздействие стенок, обусловленное адгезией, постепенно распространяется внутрь потока. На некотором участке от входа устанавливается параболическое распределение скорости. Длину этого начального участка для плоской трубы определил Г. Шлихтинг [4]: $L_n = 0{,}16d\mathrm{Re}$, где $d$ — расстояние от оси до стенки трубы.

Аналогично длину этого участка в круглой трубе рассчитал С. М. Тарг [2]: $L_n = 0{,}16r\mathrm{Re}$, где $r$ — радиус трубы.

Законы движения жидкостей справедливы и для газов, если скорость потока оказывается меньше скорости звука, так как в этом случае газы можно считать практически несжимаемыми. Следовательно, можно ожидать, что в пограничном слое при обтекании воздушным потоком крыльчатых профилей воздействие вследствие адгезии молекул поверхности твердого тела на молекулы воздушного потока аналогично воздействию при обтекании поверхностей твердых тел жидкостью. Сила сопротивления воздушной среды движению крыльчатого профиля распадается на две составляющие: силу лобового сопротивления и подъемную силу. В работе [6] показано, что для крыльев очень большого размаха коэффициент $C_y$ подъемной силы пропорционален углу $\alpha$ атаки и не зависит ни от скорости движения, ни от размаха крыльев: $C_y = \mathrm{const}\,\alpha$. Для крыла в виде плоской бесконечно большой пластины, накло-

ненной под малым углом атаки, $C_y = 2\pi\alpha$, т. е. коэффициент $C_y$ постоянен и равен $2\pi$. Поэтому можно предположить, что постоянная составляющая ($2\pi$) коэффициента подъемной силы для крыла в виде бесконечно большой плоской пластины обусловлена адгезионным взаимодействием молекул поверхности твердого тела с молекулами пограничного слоя воздушного потока.

В работе [3] показано, что существует критическое число Рейнольдса, равное $2\pi$, при котором возникает особый режим ламинарного течения жидкости вблизи поверхности твердого тела, характеризуемый когезией частиц жидкости к неподвижному пристеночному слою жидкости. При этом анализ данных, полученных опытным путем, показал, что коэффициент силы отрыва жидких частиц от пристеночного слоя жидкости находится по формуле $C_\xi = 1/2\pi \approx 0{,}16$.

Это возможно, если предположить, что существует граница раздела между ламинарным потоком жидкости и слоем жидкости вблизи поверхности твердого тела. Действительно, вода вблизи поверхности твердого тела обладает сдвиговой прочностью [3], т. е. происходит изменение механических свойств жидкости вследствие адгезии.

Внутреннюю задачу гидравлики — течение жидкости в трубке — представим в виде внешней задачи — обтекание жидкостью твердого тела. Для этого используем метод, при котором продольное сечение трубки рассматривается как элементарная пластина. Тогда максимальная скорость ламинарного течения жидкости вдоль оси трубки будет аналогична скорости невозмущенного потока в случае обтекания жидкостью твердого тела, а пограничным слоем будем считать слой от оси трубки до ее стенки. Это позволяет применить для анализа особого режима ламинарного течения жидкости вблизи поверхности твердого тела универсальную формулу гидродинамической силы [2] — лобового сопротивления и подъемной силы пластинки:

$$F_g = C_y S_g \rho v^2/2, \tag{6}$$

где $\rho$ — плотность жидкости; $S_g$ — площадь обтекания; $v$ — скорость невозмущенного потока; $C_y$ — коэффициент подъемной силы.

Одна из составляющих силы сопротивления — подъемная сила пластинки, с учетом реального вихревого движения жидких частиц рассчитывается по формуле Жуковского—Кутта:

$$F_g = \rho y v H, \tag{7}$$

где $y$ — размер тела; $H$ — мера вихревого движения, выраженная через линейную скорость [2].

Если силы инерции движения жидких частиц превышают силы вязкости в пристеночном слое жидкости, можно приравнять правые части уравнений (6) и (7):

$$C_y S_g \rho v^2/2 = \rho y v H. \tag{8}$$

Тогда, полагая $S_g = y^2$, получим:

$$H = 1/2 C_y y v. \tag{9}$$

Выражение (9) описывает реальное вихревое движение жидких частиц вблизи поверхности твердого тела в случае, если сила сопротивления жидкой среды пропорциональна квадрату скорости движения жидких частиц. При этом параметр $H$ определяется размером обтекаемого тела, коэффициентом подъемной силы пластинки и скоростью потока жидкости. Адгезионное взаимодействие жидкости и твердого тела выражено через постоянную составляющую коэффициента подъемной силы пластинки, т. е. через $2\pi$.

Для случая, когда сила вязкости доминирует, Г. Стокс теоретически вывел коэффициент гидроаэродинамической характеристики шара: $3 \cdot 2\pi$ и формулу силы сопротивления шара:

$$F_g = 6\pi\eta y v. \tag{10}$$

Приравняв правые части уравнений (7) и (10), получим:

$$H = 6\pi v. \tag{11}$$

Выражение (11) отражает реальное вихревое движение жидких частиц вблизи поверхности твердого тела в случае, если сила сопротивления жидкой среды пропорциональна первой степени скорости движения жидких частиц. Тогда циркуляция скорости $H$ определяется величиной $1/C_\xi$ и скоростью потока жидкости. Адгезионное взаимодействие жидкости и твердого тела выражено через $1/C_\xi$.

Природа физических процессов в деформируемых телах до сих пор во многом неясна. Так, закономерности пластичных деформаций аналогичны закономерностям внутреннего трения, так как силы взаимодействия между элементами зависят от скорости деформации.

В случае особого режима ламинарного течения жидкости когезию частиц жидкости на гипотетической границе раздела между неподвижным пристеночным слоем жидкости и потоком можно характеризовать инерционными свойствами реального вихревого движения частиц жидкости вблизи поверхности твердого тела (9) и вязкого трения (11): $1/2 C_y y v = 6\pi v$ или $\mathrm{Re} = 12\pi/C_y = 12\pi/12\pi\alpha = 6/\alpha$.

В случае обтекания горизонтально расположенной пластинки, при котором жидкость течет слоями, параллельными стенке трубки, множитель $\alpha$ можно заменить на $\cos\alpha = 1$. Тогда получим, несмотря на принятые допущения, число Рейнольдса — $2\pi$.

Рассмотрим связь коэффициента подъемной силы ($C_y$), содержащего постоянную составляющую $2\pi$, с числом Рейнольдса, при котором возникает когезия частиц потока жидкости с частицами неподвижного пристеночного слоя жидкости, не используя понятие циркуляции скорости.

Если использовать из теории гидромеханики принцип отвердения, то получим: $F_\eta = \eta S dv/dl$. Здесь $S$ — площадь соприкосновения слоев; $dv/dl$ — градиент скорости, который можно представить в виде скорости изменения сдвиговой деформации $v/l$:

$$F\eta = \eta S v/l, \tag{12}$$

где $l$ — диаметр трубки.

При ламинарном течении, соответствующем числу Рейнольдса, т. е. $2\pi$, гидродинамическая сила (6) близка к

значению силы вязкости (12): $C_y S_g \rho v^2/2 = \eta S v/l$ или, полагая $S_g = l^2$, получим: $C_y = \eta/\rho v(l/2) = 1/\mathrm{Re} = 1/2\pi \approx 0{,}16$.

Значение коэффициента подъемной силы в условии особого режима ламинарного течения жидкости вблизи поверхности твердого тела согласуется с теоремой Коши—Гельмгольца о деформации сдвига как простейшей составляющей разложения сложного движения жидкости [2] и с формулой деформации сдвига идеального кристалла Я. И. Френкеля.

Таким образом, выявлена связь между гидроаэродинамической характеристикой бесконечно большой плоской пластины, равной $2\pi\alpha$, и числом Рейнольдса, равным $2\pi$, при котором возникает особый режим ламинарного течения жидкости. При этом совпадение величин постоянной составляющей коэффициента подъемной силы и числа Рейнольдса свидетельствует о том, что выведенная теоретически константа гидроаэродинамической характеристики плоской пластинки бесконечного размаха ($C_y = \mathrm{const}\alpha = 2\pi\alpha$) получила экспериментальное подтверждение [3]. Следовательно, на мезоскопическом расстоянии (промежуточный объем между микроскопической и макроскопической областями) в окрестности твердого тела в случае особого режима ламинарного течения кинематическая вязкость и скорость жидкости связаны следующим соотношением: $v \approx 0{,}16yv$, где $y$ — поперечный размер ламинарного потока жидкости.

Это указывает на то, что параметр $C_\xi$ определяется свойством контактных сил, зависящих от микрогеометрии дискретных объектов — связанных между собой силами взаимного притяжения и отталкивания молекул конденсированных тел.

Постоянный параметр равен иррациональному множителю $2\pi$, что наблюдается и в электродинамике, когда формула силы взаимодействия двух проводников тока включает в себя множитель $2\pi$, не входящий в саму константу коэффициента пропорциональности. Наличие множителя $2\pi$ в формуле объясняется геометрическими свойствами пространства [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Мултановский В. В.** Курс теоретической физики. М.: Просвещение, 1988. 78 с.
2. **Емцов Б. Т.** Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1978. 463 с.
3. **Ванчиков В. Ц.** Гидродинамические свойства и методы управления вязким подслоем технических систем / Дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ: ВСГТУ, 2001.
4. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1982. 712 с.
5. **Эфрос А. Л.** Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 161 с.
6. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Т. 6. Гидромеханика. М.: Наука, 1988. 736 с.
7. **Суорц К. Э.** Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 2. М.: Наука, 1987. 221 с.


---


УДК 621.01:621.852



В. С. УТКИН, д-р техн. наук (ВоГТУ, г. Вологда)


# Расчет индивидуальной клиноременной передачи по условиям тяговой способности и долговечности


Предложена новая методика расчета надежности индивидуальной клиноременной передачи по условиям тяговой способности передачи и долговечности клиновых ремней при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах модели предельных состояний передачи, которая основывается на теории возможностей.


Клиноременные передачи благодаря своим достоинствам нашли широкое применение в машиностроении [1]. Их работоспособность определяется двумя предельными состояниями: тяговой способностью и усталостной прочностью. Первое предельное состояние характеризуется проскальзыванием ремня относительно ведомого шкива, второе — усталостным разрушением ремня. Для упрощения задачи будем рассматривать эти предельные состояния независимо друг от друга, что также обеспечит запас по надежности. Вероятность $P_с$ безотказной работы клиноременной передачи определяется как совокупность вероятности $P_т$ безотказной работы по тяговой способности передачи и вероятности $P_п$ безотказной работы по прочности ремня: $P_с = P_т P_п$. При определении надежности по прочности ремня Д. Н. Решетов [2] использовал вероятностно-статистический подход в предположении нормального (гауссовского) закона распределения и для нагрузки, и для прочности ремня как для продукции массового производства. Для индивидуальной клиноременной передачи такой подход не применим из-за ограниченности статистической информации по определяющим (базисным) контролируемым параметрам в математических моделях предельных состояний, для которых применение нормальных законов распределения случайных величин неправомочно. Поэтому оценка надежности клиноременной передачи строится на методах анализа ограниченной (неполной) статистической информации неопределенности на основе теории возможностей [3—5].

Такой подход был рассмотрен в работе [6] применительно к индивидуальным механическим системам. Перенесем его на расчет надежности индивидуальной клиноременной передачи.

Сначала рассмотрим силу $F_0$ начального натяжения ремня (в одно- и многоременных передачах) при нерабочем состоянии системы. В работе [1] для контроля натяжения ремня была предложена формула

$F_0 \approx 0{,}5F_к l_*/f$, где $F_к$ — поперечная нагрузка на ремень, рекомендуется $10 \div 50$ Н; $l_*$ — половина свободной длины ветви ремня; $f$ — стрела провисания ремня под нагрузкой. Предлагается уточнить $F_0$ на момент диагностики клиноременной передачи, если возможно снятие ремней со шкивов с последующей их установкой и натяжением. Ремень снимается, надевается на два шкива (масса нижнего шкива известна) и растягивается. Для этого к нижнему шкиву подвешивают грузы различной массы (рис. 1). На одной ветви ремня *1* устанавливают рамку *3* с жесткими опорами, индикатором часового типа для измерения перемещения ремня и нагружающим устройством *4*. Масса груза *6* меняется. Аналогичное устройство используют при определении натяжения арматуры в железобетонных конструкциях [7].

Для каждого ремня исследуемой клиноременной передачи по результатам испытаний при постоянном значении $F_к$ строят зависимость $F_0$ от $f$. Затем измеряют прогиб $f$ ремня и определяют параметр $F_0$ для каждого ремня передачи.

Если, используя тензометр, определить относительную деформацию $\varepsilon = \Delta l/l$ ремня, то можно определить его модуль упругости: $E = F_0/A_i\varepsilon_0$, где $A_i$ — площадь поперечного сечения ремня; $\varepsilon_0$ — деформация от предварительного натяжения ремня. В процессе эксплуатации ремня значение его модуля упругости уменьшается.

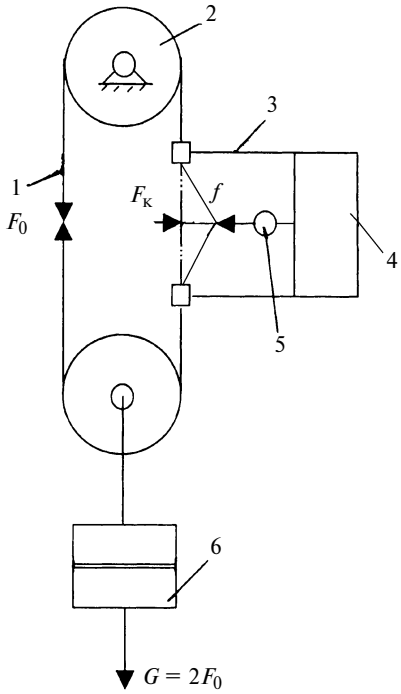



**Рис. 1. Устройство для испытания ремня:** *1* — ремень; *2* — шкивы; *3* — рамка; *4* — нагружающее устройство; *5* — индикатор часового типа; *6* — груз

Полезная нагрузка (окружная сила) на ведущем шкиве неравномерно распределяется по ремням передачи:

$$F_{ti} = F_t F_{0i} / \sum_{i=1}^{m} F_{0i}, \qquad (1)$$

где $m$ — число ремней; $F_{0i}$ — предварительное натяжение $i$-го ремня; $F_t = 2M_1/d_1$ — полезная нагрузка на ведущем шкиве ($M_1$ — крутящий момент на ведущем шкиве, $d_1$ — диаметр этого шкива). Крутящий момент находится по формуле $M_1 = 9554N/n$, где $N$ — мощность электродвигателя, $n$ — частота вращения шкива. Тогда

$$F_t = 2 \cdot 9554N/(dn). \qquad (2)$$

## Определение надежности передачи по тяговой способности

Предельное состояние по тяговой способности клиноременной передачи определяется началом буксования, что происходит при $\alpha_{c\max} = \alpha$, где $\alpha$ — угол обхвата на ведущем (меньшем) шкиве.

Известно, что

$$\alpha = 180 - 57(d_2 - d_1)/a, \qquad (3)$$

где $a$ — межосевое расстояние; $d_2$ — диаметр ведомого шкива ($d_2 > d_1$); $\alpha_{c\max}$ — угол упругого скольжения.

Надежность клиноременной передачи по тяговой способности определяется вероятностью события "$\alpha_{c\max} \leqslant \alpha$". Значение параметра $\alpha_c$ зависит от сил $F_1$ и $F_2$: $F_t = F_1 - F_2$.

Известно [1], что если не учитывать силу инерции, то $F_1 = F_0 - 0{,}5F_t$, $F_2 = F_0 - 0{,}5F_t$. Применив формулу Эйлера $F_1/F_2 = l^{f_*\alpha_c}$ [1], получим $(F_0 + 0{,}5F_t)/(F_0 - 0{,}5F_t) = l^{f_*\alpha_c}$, где $f_* \approx 3f$ — приведенный коэффициент трения ($f$ — коэффициент трения). Известно, что для ремня клиноременной передачи $f_* = f/\sin(\varphi/2)$ при $\varphi = 40°$ [1]. Тогда $\alpha_c = [\ln(F_0 + 0{,}5F_t) - \ln(F_0 - 0{,}5F_t)]/f_*$.

С учетом формулы (2) получим:

$$\alpha_c = [\ln\{F_0 + 9554N/(d_1 n_1)\} - \ln\{F_0 - 9554N/(d_1 n_1)\}]/f_*.$$

Условие предельного состояния передачи по тяговой способности примет вид:

$$[\ln\{F_0 + 9554N_{\max}/(d_1 n_1)\} - \ln\{F_0 - 9554N_{\max}/(d_1 n_1)\}] \leqslant f_*\alpha, \qquad (4)$$

где $N_{\max}$ — максимальная мощность электродвигателя.

Значение $F_0$ находится описанным выше способом. Этот параметр является нечеткой переменной вследствие ограниченного числа и неточности измерений. Значение $N_{\max}$ можно определить с помощью ваттметра. Этот параметр также является нечеткой переменной. Частоту вращения ведущего шкива можно принять как детерминированную величину или как нечеткую переменную, так же как и параметры $d_1$, $\alpha$ и $f_*$.

Выражение (4) примет вид:

$$[\ln\{\tilde{F}_0 + 9554\tilde{N}/(d_1 \tilde{n}_1)\} - \ln\{\tilde{F}_0 - 9554\tilde{N}/(d_1 \tilde{n}_1)\}] \leqslant \alpha f_*$$

или

$$\{\tilde{F}_0 + 9554\tilde{N}/(d_1 \tilde{n}_1)\}/\{\tilde{F}_0 - 9554\tilde{N}/(d_1 \tilde{n}_1)\} \leqslant l^{\alpha f_*}. \qquad (5)$$

Коэффициент трения $f$ в контакте ремень—шкив зависит от скорости проскальзывания [8]. Такими параметрами, как температура и сила прижатия, можно пренебречь в силу их незначительных величин.

Так как оценивается надежность для текущего момента времени, то небольшой объем статистических данных и неточность измерений контролируемых параметров в выражении (5) дают основание считать, что по теории возможностей [3] $\tilde{F}_0$, $\tilde{N}$ и $\tilde{n}$ — нечеткие переменные, и расчет клиноременной передачи следует проводить, используя методы, изложенные в работах [3—5].

Все нечеткие переменные будем характеризовать функцией распределения возможностей (ФРВоз):

$$\pi_X(x) = \exp\{-[(x - a_x)/b_x]^2\}, \qquad (6)$$

где $X$ — нечеткая переменная; $x$ — возможное ее значение; $a_x$, $b_x$ нахо-

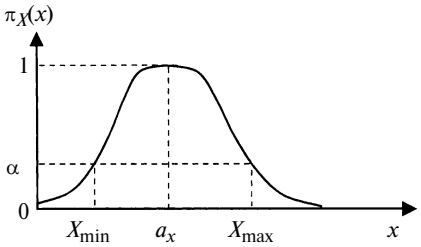



**Рис. 2. ФРВоз $\pi_X(x)$**

дят из вариационного ряда (множества) значений $\{x\}$:

$$a_x = 0{,}5(X_{\max} + X_{\min});$$

$$b_x = 0{,}5(X_{\max} - X_{\min})/\sqrt{-\ln\alpha}\,,$$
$$\alpha \in [0,\ 1].$$

Задают значения уровня среза [9].

Из формулы (6) найдем обратную функцию: $x = a \pm b\sqrt{-\ln\alpha_*}$, где $\alpha_* = \pi(x)$; $x = \pi_X^{-1}(x)$. Вид этой функции показан на рис. 2.

Для нечетких переменных из выражения (6) имеем:

$$\left.\begin{aligned} &\pi_{\tilde F_0}(F_0) = \exp\{-[(F_0 - a_{F_0})/b_{F_0}]^2\};\\ &\pi_{\tilde N}(N) = \exp\{-[(N - a_N)/b_N]^2\};\\ &\pi_{\tilde n}(n) = \exp\{-[(n - a_n)/b_n]^2\}. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Для параметров $a$ и $b$ ФРВоз уравнения (7) предварительно измеряют натяжения ремней ($F_{0i}$) способами, описанными выше. Результаты измерений представляют в виде вариационного ряда: $F_{0i} = \{F_{0i_1}, F_{0i_2}, ..., F_{0i_k}\}$, где $k$ — число измерений $F_{0i}$ в $i$-м ремне.

Отсюда найдем среднее значение: $a_{F_{0i}} = 0{,}5(F_{0i_{\max}} + F_{0i_{\min}})$ и параметр $b_{F_{0i}} = 0{,}5(F_{0i_{\max}} - F_{0i_{\min}})/\sqrt{-\ln\alpha}$, $\alpha \in [0,\ 1]$.

Значения $\alpha$ (уровень среза) задают одинаковыми для всех нечетких переменных [9].

Аналогично определяют мощность электродвигателя без учета потерь в передачах (запас по надежности): $N = \{N_1, N_2, ..., N_m\}$, где $m$ — число измерений, а также с помощью тахометра устанавливают частоту вращения ведущего шкива. По результатам испытаний вычисляют значения параметров $a_N$, $b_N$, $a_n$, $b_n$.

Рассмотрим метод определения надежности клиноременной передачи, используя математическую модель предельного состояния передачи по тяговой способности (5) и теорию возможностей [3—5].

Сначала рассмотрим передачу с одним ремнем, для упрощения будем считать, что $n_i$ — детерминированная величина, так как известно, что $n_i$ изменяется незначительно. Введем нечеткую функцию от нечетких аргументов:

$$Y(y) = \{\tilde F_0 + 9554\tilde N/(d_1 n_1)\}/\{\tilde F_0 - 9554\tilde N/(d_1 n_1)\} \leqslant l^{\alpha f_*}. \quad (8)$$

Найти аналитическое выражение ФРВоз для $Y(y)$ при известных ФРВоз уравнений (7) практически невозможно. Поэтому используем принцип обобщения Л. Заде [3—5]. Найдем обратную функцию $Y^{-1}(y) = y$. По принципу обобщения, обозначив $\sqrt{-\ln\alpha_*} = \beta$, ($\alpha_* = l^{-\beta^2}$) и использовав обратные функции (7) для выражения (8), получим:

$$y = [(a_{F_0} - b_{F_0}\beta) + (a_{N_*} - b_{N_*}\beta)]/[(a_{F_0} + b_{F_0}\beta) - (a_{N_*} - b_{N_*}\beta)], \quad (9)$$

где $a_{N_*} = a_N 9554/(d_1 n_1)$;

$b_{N_*} = b_N 9554/(d_1 n_1)$.

Если от $F_0$ и $N$ функция $Y(y)$ будет возрастающей, перед $b_{F_0}$ и $b_{N_*}$ ставят знак минус, в противном случае — знак плюс [4].

Подробнее использование принципа обобщения Л. Заде применительно к задачам определения надежности механических систем изложено в работе [6]. В уравнении (9) два неизвестных: $y$ и $\beta$. Значения $y$ задают, используя выражение (8): $y = l^{\alpha f_*}$, тогда $\beta = \sqrt{-\ln\alpha_*}$.

Среднее значение $a_y$ при $\alpha_* = 1$ (см. рис. 2) или $\beta = 0$ найдем из уравнения (9):

$$a_y = (a_{F_0} + a_{N_*})/(a_{F_0} - a_{N_*}).$$

При $a_y \leqslant l^{\alpha f_*}$ [см. выражение (8)] возможна безотказная работа клиноременной передачи по тяговой способности $R = 1$, а возможность отказа $Q = \alpha_* = l^{-\beta^2}$. Мера необходимости функционирования передачи определяется уравнением $N = l - Q$. Надежность передачи характеризуется интервалом $[N, R]$ или $[\underline{P}, \overline{P}]$. Истинная надежность находится внутри этого интервала. Рассмотрим пример клиноременной передачи с одним ремнем.

Пусть $a_{F_0} = 200$ Н; $b_{F_0} = 20$ Н; $a_{N_*} = 150$ Н; $b_{N_*} = 15$ Н; $d_1 = 200$ мм; $n_1 = 1000$ мин$^{-1}$; $\alpha = 2{,}8$ рад; $f_* = 0{,}85$; $l^{\alpha f_*} = 10{,}87$.

Тогда $a_y = (200 + 150)/(200 - 150) = 7 < l^{\alpha f_*} = 10{,}87$, следовательно, $R = 1$.

Из уравнения (9) при $y = 10{,}87$ найдем: $\beta = 2{,}15$; $Q = l^{-\beta^2} = 0{,}0097$; необходимость безотказной работы $N = 0{,}9903$. Надежность клиноременной передачи по тяговой способности характеризуется интервалом [1; 0,9903].

Рассмотрим передачу с несколькими ремнями. Для каждого ремня определим значения $F_{0_i}$ и пропорционально этим значениям установим нагрузку по формуле (1). Далее расчет ведется как для случая с одноременной передачей. Для каждого ремня определяют параметры надежности по тяговой способности передачи: $\{R_1, R_2, ..., R_n\}$ и $\{Q_1, Q_2, ..., Q_n\}$.

Отказ одного ремня приведет к отказу других ремней вследствие их перегрузки, т. е. имеем последовательную систему (по теории надежности). Надежность системы при независимости ее составляющих [4, 5] определяется интервалом $[R_c, N_c]$, где $R_c = \min\{R_i\}$; $Q_c = \max\{Q_i\}$; $N_c = 1 - Q_c$; $i = 1, ..., m$, $m$ — число ремней.

### Определение надежности клиноременной передачи по условию долговечности ремня

Оценка надежности клиноременной передачи по несущей способности ремня по теории вероятности решена в работе [2]. При этом все случайные величины характеризуются нормальным (гауссовским) законом распределения, что не очевидно, тем более для индивидуальной передачи.

Математическая модель предельного состояния по условию долговечности в детерминистической постановке вопроса [1, 2] имеет вид:

$$\sigma_F \leqslant \sigma_E, \quad (10)$$

где $\sigma_F$ — максимальное напряжение в ремне за цикл; $\sigma_E$ — предельное напряжение ремня по несущей способности, которое может выдержать

ремень за $N$ циклов нагружения (остаточный ресурс).

В работе [1] принято:

$$\sigma_E = C/N_E^{1/m}, \qquad (11)$$

где для клиновых ремней $C = 90 \div 100$ МПа, в области высоких долговечностей $C = 38{,}2$ МПа, $m = 11$.

Значение $\sigma_E$ можно найти из условия $\sigma_E^m N_E = \sigma_\delta^m N_\delta = \text{const}$, где $N_\delta$ — базовое число циклов. При $N_\delta = 10^7$ циклов и $\sigma_\delta = 9 \div 10$ МПа для клиновых ремней $m$ будет от 7 до 11.

Сначала решим задачу относительно одноременной передачи. Напряжение $\sigma_{1\max}$ в ремне определяется силой $F_0$ натяжения ремня, тяговой силой $F_1$, центробежной силой, а также изгибом ремня вокруг ведущего шкива с диаметром $d_1$:

$$\sigma_{1\max} = \frac{F_0}{A} + \frac{F_1}{A} + \rho v^2 + Eh/d_1, \qquad (12)$$

где $\rho$ — плотность материала ремня (ее значение можно определить взвешиванием или в соответствие с данными работы [1] принять $\rho = 1200 \div 1250$ кг/м$^3$); $A$ — площадь поперечного сечения ремня; $v = \pi n_1 d_1/60$ — скорость; $h = 2y_0$ — условная высота ремня [здесь $y_0$ — расстояние от нейтрального слоя ($\sigma = 0$) ремня до большего основания трапеции]; $E$ — модуль упругости материала ремня, устанавливаемый при испытаниях на растяжение, определяют аналогично $F_0$. Необходимо найти $F_1$.

Известно, что $F_1/F_2 = l^{f_*\alpha_c}$, $F_t = F_1 - F_2$, тогда с учетом формулы (2) найдем:

$$F_1 = 2 \cdot 9554 N l^{f_*\alpha_c}/n_1 d_1 (l^{f_*\alpha_c} - 1), \qquad (13)$$

следовательно,

$$\sigma_{1\max} = \frac{F_0}{A} + \frac{2 \cdot 9554 N l^{f_*\alpha_c}}{A n_1 d_1 (l^{f_*\alpha_c} - 1)} + \rho v^2 + Eh/d_1.$$

Значения параметров $F_0$, $N$, $E$ находят измерениями, поэтому в силу ограниченного числа испытаний будем считать их нечеткими переменными. Остальные параметры будем считать детерминированными. Изменение параметра $N$ приводит к изменению значений параметров $n$, $v$, $\alpha_c$.

Примем, что $\sigma_E$ детерминированная (четкая) величин, значения которой определяют по формуле (11).

Математическая модель предельного состояния клиноременной передачи по условию долговечности с учетом нечетких переменных $\tilde{F}_0$, $\tilde{N}$, $\tilde{E}$ примет вид:

$$\frac{\tilde{F}_0}{A} + \frac{2 \cdot 9554 \tilde{N} l^{f_*\alpha_c}}{A n_1 d_1 (l^{f_*\alpha_c} - 1)} + \rho v^2 + \tilde{E} h/d_1 \leqslant \sigma_R. \qquad (14)$$

Значения $\alpha_c$ и $f_*$ найдем, как было описано выше.

Введем обозначения: $\tilde{\sigma}_0 = \alpha_1 \tilde{F}_0$; $\tilde{\sigma}_N = \alpha_2 \tilde{N}$; $\tilde{\sigma}_E = \alpha_3 \tilde{E}$, где $\alpha_1 = 1/A$; $\alpha_2 = 2 \cdot 9554 l^{f_*\alpha_c}/[A n_1 d_1 (l^{f_*\alpha_c} - 1)]$; $\alpha_3 = h/d_1$.

Тогда выражение (14) можно представить как:

$$\tilde{\sigma}_0 + \tilde{\sigma}_N + \tilde{\sigma}_E \leqslant \sigma_R - \rho v^2 = \sigma_{R\text{пр}}. \qquad (15)$$

Для всех нечетких переменных примем ФРВоз вида (6).

В выражении (15) суммируются нечеткие переменные. Нечеткая функция $z$ от двух нечетких аргументов (независимых) имеет ФРВоз вида [3, 4]:

$$\pi_Z(z) = \sup \min_x (\pi_X(x), \pi_Y(z - x)).$$

Если $X$ и $Z$ характеризуются ФРВоз (6), то

$$\pi_Z(z) = \exp\{-[z - (a_x + a_y)/(b_x + b_y)]^2\}.$$

На рис. 3 приведены ФРВоз нечетких переменных $X$, $Y$, $Z$.

Для $n$ нечетких переменных с ФРВоз (6) получим нечеткую ФРВоз:

$$\pi_Z(z) = \exp\left\{-\left[\left(z - \sum_{i=1}^{n} \alpha_i a_i\right) / \sum_{i=1}^{n} d_i b_i\right]^2\right\}, \qquad (16)$$

где $\alpha_i$ — ненулевые коэффициенты.

Тогда для левой части выражения (15) получим:

$$\pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma) = \exp\{-[(\sigma_{R\text{пр}} - (a_0 + a_N + a_E)/(b_0 + b_N + b_E)]^2\},$$

где $a_0 = 0{,}5(\sigma_{0\max} + \sigma_{0\min})$; $a_N = 0{,}5(\sigma_{N\max} + \sigma_{N\min})$; $a_E = 0{,}5(\sigma_{E\max} + \sigma_{E\min})$, $a_0$, $a_N$, $a_E$ — средние значения нечетких переменных. Соответственно, $b_i = 0{,}5(X_{i\max} - X_{i\min})/\ln\alpha$, $\alpha \in [0, 1]$ для всех нечетких переменных $F_0$, $N$, $E$ ($i = 1, 2, 3$); $\sigma_{R\text{пр}}$ — приведенное предельное по несущей способности напряжение [см. выражение (15)].

Если $a_0 + a_N + a_E < \sigma_{R\text{пр}}$, то возможность нормального функционирования передачи по долговечности ремня $R = 1$, а возможность отказа $Q = \pi_{\tilde{\sigma}}(\sigma_{R\text{пр}})$. Необходимость безотказной работы ($N = 1 - Q$) и надежность будут характеризоваться интервалом $[N, R]$.

Рассмотрим пример определения надежности передачи по условию долговечности ремня для передачи с одним ремнем. Пусть: $a_{F_0} = 2$ МПа; $b_p = 0{,}2$ МПа; $a_N = 3$ МПа; $b_N = 0{,}2$ МПа; $a_E = 1$ МПа; $b_E = 0{,}1$ МПа; $\gamma = \sigma_R - \rho v^2 = 7{,}0 - 0{,}1 = 6{,}9$ МПа.

Так как $a_{F_0} + a_N + a_E = 2 + 3 + 1 = 6 < \gamma = 6{,}9$ МПа, то $R = 1$; $\pi_{\tilde{\sigma}}(6{,}9) = \exp\{-[(6{,}9 - 6{,}0)/0{,}5]^2\} = 0{,}039$; $Q = 0{,}039$; $N = 0{,}961$.

Надежность передачи по долговечности ремня характеризуется интервалом [0,961; 1]: нижнее значение вероятности $\underline{P} = 0{,}961$, верхнее — $\overline{P} = 1$.

Рассмотрим передачу с несколькими ремнями. В этом случае систему будем рассматривать как последовательную систему независимых элементов в теории надежности.

Для того чтобы учитывать зависимость элементов, необходимо ее

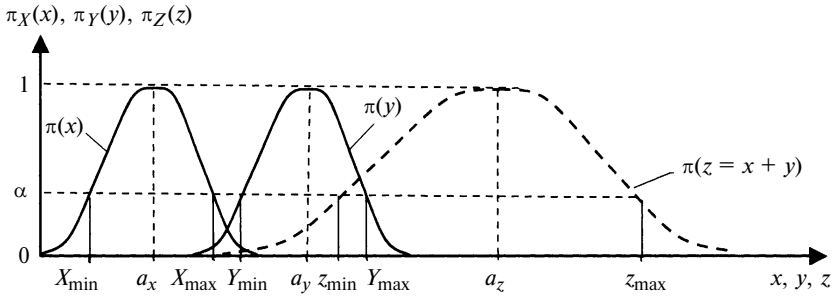



**Рис. 3. ФРВоз $a_z = a_x + a_y$, $b_z = 0{,}5(z_{\max} - z_{\min})/\sqrt{-\ln\alpha}$, $Z_{\max} = X_{\max} + Y_{\max}$, $Z_{\min} = X_{\min} + Y_{\min}$**

выявить. И в этом случае надежность системы повышается. Однако эта задача пока не имеет решения.

Как уже было отмечено, надежность последовательной системы определяется показателями надежности всех элементов:

$$R_c(t) = \min R_i(t);\ Q_c(t) = \max Q_i(t);$$
$$N_c(t) = 1 - Q_c(t);\ i = 1, ..., n.$$

Для системы с несколькими ремнями найдем значения параметров $R$ и $Q$ для каждого ремня в отдельности, так как они отличаются значениями $F_{0i}$, $N_i$, а возможно, и модулем упругости $E_i$. Множества $\{F_{0i}\}$ и $\{E_i\}$ устанавливают путем испытаний каждого ремня, находят ФРВоз для $F_{0i}$ и $E_i$. Сложнее определить напряжения от силы $F_1$, так как распределение нагрузки $F_t$ по ремням зависит от модулей упругости материала, их длин, размеров канавок и отклонений от параллельности шкивов.

В работе [2] предложена приближенная формула для определения силы $F_{1i}$ в ведущей ветви $i$-го ремня от $F_t$:

$$F_{1i} \approx 0{,}5A_iE_i\left[1 + \frac{F_t/A_i - E}{Ed_2/d_1}\,\frac{d_{2i}}{d_{1i}}\right] + F_{0i},$$

где $d_1$, $d_2$, $E$ — средние значения соответственно диаметров шкивов и модулей упругости материалов ремней.

Если принять $\tilde{F}_t = \dfrac{2 \cdot 9554\tilde{N}l^{f_*\alpha_c}}{n_1 d_1(l^{f_*\alpha_c} - 1)}$, а $A_i$ считать детерминированной величиной, то дальнейший расчет надежности каждого ремня данной передачи можно проводить по методике расчета надежности передачи с одним ремнем, начиная с формулы (12).

### Расчет клиноременной передачи на надежность по тяговой способности и долговечности

В этом случае каждое предельное состояние рассматривают как элемент системы. В расчете надежности передачи имеем последовательную систему из двух независимых нечетких величин: $R_c = \min R_i$ и $Q_c = \max Q_i$, где $i$ — число предельных состояний.

Оценка надежности передачи дает возможность принять правильное решение о продолжении ее эксплуатации, регулировке предварительного натяжения ремней, определить остаточный ресурс [10].

По одному элементу системы нельзя оценить надежность всей системы. А так как в рассматриваемую нами систему кроме ремней входят валы, подшипники, шкивы, станина и др., необходимо знать их надежность. Для этого разработаны или находятся в стадии разработки другие методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Иосилевич Г. Б.** Детали машин. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
2. **Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З.** Надежность машин/Под. ред. Д. Н. Решетова. М.: Высш. шк., 1988. 238 с.
3. **Дюбуа Д., Прад А.** Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
4. **Уткин В. С., Уткин Л. В.** Определение надежности строительных конструкций. Вологда: ВоГТУ, 2000. 176 с.
5. **Гуров С. В., Уткин Л. В.** Надежность систем при неполной информации. СПб.: Любавич, 1999. 160 с.
6. **Уткин В. С.** Определение надежности индивидуальных механических систем при ограниченной информации // Вестник машиностроения. 2006. № 5. С. 37—39.
7. **Золотухин Ю. Д.** Испытание строительных конструкций. М.: Высш. шк., 1983. 203 с.
8. **Лариков Е. А., Виляевская Т. И.** Узлы и детали механизмов приборов. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
9. **Уткин В. С.** Значение уровня риска в теории возможностей // Строительные материалы. 2004. № 8. С. 35.
10. **Уткин В. С., Погодин Д. А.** Прогнозирование долговечности материалов и конструктивных элементов при ограниченной статистической информации // Конструкции композиционных материалов. 2003. № 1. С. 71—74.


---

УДК 621.22-192

А. Ф. ЗАЙЧИКОВ, канд. техн. наук (Москва)

# Надежность систем

### Состояние проблемы

Надежность является комплексным свойством, которое может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость [1].

Необходимость количественной оценки безотказности была обусловлена бурным развитием электроники, настолько усложнившим различные устройства и системы, что стало практически невозможно выбрать их оптимальный вариант. Поэтому были разработаны методы расчета надежности и испытаний элементов и систем, основанные на математической обработке результатов наблюдения отказов совершенно одинаковых кондиционных устройств.

Однако эти методы нельзя применять в тех областях техники, включая самолетостроение, от которых зависят безопасность и жизнь людей. Здесь недопустимо бесстрастное наблюдение отказов: требуется, в том числе и стандартами ИКАО, расследовать любой отказ, выяснить причину и принять меры по ее устранению. При этом надежность элемента изменяется, но определить, как она изменяется, какой была и какой стала после проведения необходимых мероприятий, невозможно, потому что произошедший отказ, во-первых, был единичным, а во-вторых, относился к элементу системы до его доработки.

Поэтому можно количественно оценить долговечность деталей, но невозможно определить вероятность их отказа. В связи с этим, на-

пример, в Авиационных правилах установлено, что если агрегаты прошли все необходимые испытания, то они считаются практически безотказными. Поэтому подавляющее большинство работ и исследований посвящены оценке долговечности и ресурса деталей и проблемам обеспечения их увеличения [2, 3].

Тем не менее проблема оценки мероприятий по повышению безотказности систем и выбору их оптимальной структуры может быть решена и без знания абсолютных значений безотказности элементов. Достаточно ограничиться оценкой их относительной безотказности, учитывая, что бурное развитие науки и техники непрерывно ведет к усложнению систем машин в связи с выполнением ими все больших функций. В частности, это относится и к гидравлическим системам, используемым для привода различных механизмов машин.

Широкое применение гидропривода обусловлено рядом его преимуществ как по функциональным характеристикам, так и по массогабаритным показателям. Развитие гидропривода приводит к усложнению гидросистем, обостряя проблему обеспечения их надежности и живучести.

Отказы элементов систем по их последствиям можно разделить на два класса:

1) функциональные — отказы, приводящие к отказу только одного или всего нескольких элементов (отказы типа обрыва проводника, заклинивания золотника и т. п.),

2) энергетические — отказы, приводящие к отказу всех взаимно соединенных элементов в результате прекращения поступления к ним энергии (отказы типа короткого замыкания или внешней негерметичности).

Значительная часть отказов электросистем происходит вследствие коротких замыканий, а гидросистем — из-за внешней негерметичности их элементов. Так, например, вследствие утечки гидрожидкости через трещины бустеров разбились только в течение двух лет семь самолетов F-4, в связи с чем директор департамента авиационной безопасности США сообщил, что ежедневно летные происшествия обходятся авиации США в 1,2 млн долл. и влекут гибель в среднем двух летчиков [4].

Еще больший урон может нанести недостаточная живучесть технических систем в военное время. Опыт боевых действий США в Юго-Восточной Азии [1] показал, например, что потери летательных аппаратов в значительной степени обусловлены уязвимостью их гидросистем управления. Хотя на долю последних приходится ≈ 5 % общей площади поверхности ЛА, тем не менее около 25 % сбитых самолетов было потеряно из-за повреждений систем управления. Интересно, что потери от ствольного оружия в 15 раз превысили потери от зенитных ракет, применение которых во Вьетнаме заставило американцев летать на малых высотах, где они обстреливались зенитной артиллерией и даже из ручного стрелкового оружия. В этой связи характерен, например, тот факт, что 232 попадания в несущие винты вертолетов CH-47 вызвали прекращение такого же числа полетов, как всего 43 попадания снарядов и осколков в гидропроводку.

Следует отметить, что ущерб, причиняемый разгерметизацией элементов гидросистем, имеет место не только в авиационной технике, но и в других видах транспорта и отраслях промышленности. Так, на водном транспорте негерметичность гидросистем приводит не только к прекращению их функционирования, но и к порче грузов в трюмах, где располагаются элементы гидросистем. К серьезным последствиям приводит нарушение герметичности даже водяных систем теплоснабжения. Разрушение трубопроводов, их стыков и радиаторов внутри зданий влечет затопление горячей водой с последующей порчей элементов конструкции зданий, установленного в них оборудования и отделки помещений, а также может привести к замыканию электропроводки.

Проблема обеспечения надежности и живучести систем предъявляет серьезные требования к агрегатам, однако необходимо создавать такие системы, которые сохраняли бы работоспособность при отказе некоторой части их элементов. Реализовать этот принцип можно путем резервирования элементов и системы в целом, а также с помощью автоматов защиты, локализующих поврежденные участки путем автоматического отключения их от системы после появления энергетических отказов.

Проблема создания надежных систем из ненадежных элементов путем соответствующей организации избыточности была впервые затронута в 1952 г. Дж. Нейманом, прочитавшим в Калифорнийском технологическом институте шесть лекций по вероятностной логике, изданных позднее в виде классической статьи [5]. Он показал, что путем применения логических элементов типа "штрих Шеффера" можно построить новый элемент, принцип действия которого не изменится, а надежность может достигнуть заданного уровня. Исходя из этих идей, Э. Мур и К. Шеннон провели изящный анализ релейных схем [6], однако их работы, по словам самих же авторов, носили характер математических упражнений и были далеки от практического применения.

В дальнейшем основные положения, разработанные Э. Муром и К. Шенноном, непрерывно развивались. В частности, было предложено понятие функции надежности (ФН) системы [7], под которой подразумевается аналитическая зависимость вероятности безотказной работы (ВБР) системы от ВБР входящих в нее элементов. Функция надежности системы как аналитическая зависимость ВБР системы от ВБР входящих в нее элементов может быть определена различными способами, включая прямой перебор возможных состояний элементов и системы. Однако для реальных систем прямой перебор неприемлем вследствие труднообозримого количества возможных состояний.

Наиболее реальным и простым представляется метод определения функции надежности системы с помощью теоремы разложения, основанной на формуле полной вероятности и заключающейся в том, что ФН системы с избыточностью равна

сумме произведения вероятности безотказной работы $i$-го элемента на ФН оставшейся части системы и произведения вероятности отказа того же элемента на ФН оставшейся части системы при отказе рассматриваемого элемента. К сожалению, вычисление ФН реальных систем весьма затруднительно даже с помощью современных ЭВМ, так как многократное перемножение близких к единице вероятностей безотказной работы элементов системы требует при существующих количествах разрядов ЭВМ принятия специальных мер по повышению точности вычислений.

Однако идея разложения всего огромного множества вероятных состояний системы на некоторые определенные подмножества позволяет весьма успешно вычислять обратную величину — вероятность отказа системы через вероятности отказов ее элементов. При этом все множество возможных отказных состояний системы делится на два подмножества:

1) состояния, обусловленные отказами недопустимого с точки зрения работоспособности системы, числа подсистем вследствие энергетических отказов их элементов,

2) все остальные неработоспособные состояния системы.

Этот метод позволяет получить как полные, так и асимптотические зависимости с учетом малости вероятностей отказов элементов и производить расчеты с требуемой точностью без принятия специальных мер к ее обеспечению.

Так, обозначив вероятность пребывания системы в первом подмножестве состояний через $Q_1$, а во втором — через $Q_2$ и учитывая, что вероятность их одновременного появления меньше на несколько порядков вероятности пребывания системы в любом из них, получим, что вероятность отказа системы равна сумме вероятностей ее пребывания в каждом из этих подмножеств, т. е. $Q = Q_1 + Q_2 - Q_1 Q_2 \cong Q_1 + Q_2$.

При определении отказных состояний системы необходимо учитывать, что с точки зрения энергетических отказов потребители энергии и устройства защиты (УЗ) системы от энергетических отказов могут находиться, по крайней мере, в трех несовместных ситуациях: *а* — энергетические отказы отсутствуют; *б* — имеют место энергетические отказы и несрабатывания УЗ; *в* — имеют место энергетические отказы, но УЗ отключают отказавшие участки от системы.

Вероятности появления этих ситуаций равны:

$$P(a) = (1 - q_{\text{УЗэ}}) \prod_{\xi = 1}^{k_j} \left(1 - \alpha_\xi q\xi\right) \cong$$

$$\cong 1 - \left(q_{\text{УЗэ}} + \prod_{\xi = 1}^{k_j} \alpha\xi q\xi\right);$$

$$P(б) = q_{\text{УЗ}}[1 - P(a)],$$

$$P(в) = (1 - q_{\text{УЗ}})[1 - P(a)],$$

где $q_{\text{УЗэ}}$ — вероятность энергетического отказа УЗ; $k_j$ — число потребителей, обслуживаемых УЗ; $\alpha_\xi$ — коэффициент (доля) энергетических отказов $\xi$-го потребителя; $q_\xi$ — вероятность отказа $\xi$-го потребителя; $q_{\text{УЗ}}$ — вероятность отказа в срабатывании УЗ при энергетических отказах потребителей.

Появление второй ситуации в любой подсистеме приводит к прекращению ее функционирования. Если же функционирует хотя бы один потребитель подсистемы, значит, вторая ситуация отсутствует, вследствие чего может иметь место только ситуация *а* или *б*, в связи с чем вероятности появления этих ситуаций перераспределятся так, что сумма вероятностей их появления будет равна единице.

В рассматриваемом случае отказы подсистем могут происходить только из-за возникновения третьей ситуации и функциональных отказов определенного числа потребителей. Вероятность появления третьей ситуации (*в*) при принятом условии отсутствия ситуации *б* можно определить по формуле Байеса:

$$P(\hat{a}/\bar{\sigma}) = P(\hat{a})P(\bar{\sigma}/\hat{a}) / \sum_{\varphi = a}^{\hat{a}} P(\varphi)P(\bar{\sigma}/\varphi),$$

где $P(\varphi)$ — вероятность появления ситуации $\varphi$; $P(\bar{\sigma}/\varphi)$ — вероятность отсутствия ситуации *б* при появлении ситуации $\varphi$.

Очевидно, что $P(\bar{\sigma}/\sigma) = 0$, а вследствие несовместимости ситуаций $P(\sigma/a) = P(в) = 1$. Подставив эти значения в формулу Байеса, получим $P(в/\bar{\sigma}) = \dfrac{P(в)}{P(a) + P(в)}$.

После элементарных преобразований с учетом малости вероятностей отказов это выражение примет вид: $P(в/\bar{\sigma}) = 1 - P(a) \approx q_{\text{УЗэ}} + \sum_{\xi = 1}^{k_j} \alpha_\xi q_\xi$.

Полученные асимптотические выражения позволяют упростить вычисление вероятностей отказов системы и анализ ее надежности. В ряде случаев потребная мощность системы или нагрузка на нее является случайной величиной с усеченным распределением. В этих случаях более общей характеристикой системы по сравнению с ее безотказностью является эффективность, рассматриваемая как безотказность системы с учетом потребной мощности или нагрузки на систему.

Эффективность системы может быть определена, по крайней мере, двумя способами:

1) умножением вероятности каждого из состояний системы, в которых она может быть работоспособна, на соответствующую вероятность того, что располагаемая мощность больше или равна потребной, и суммированием вероятностей всех этих состояний;

2) добавлением суммы произведений вероятностей отказных состояний на соответствующие вероятности того, что располагаемая мощность больше или равна потребной, к вероятности отсутствия отказов элементов системы.

Для боевой техники отдельно рассматривается живучесть системы, определяемая как вероятность ее выживания, т. е. сохранение работоспособности при преднамеренных повреждениях элементов системы, и вычисляется так же, как и эффективность, с той лишь разницей, что вместо вероятностей отказов

элементов используются вероятности их повреждений.

### Анализ надежности

Рассмотрим общий случай сложной резервированной иерархической системы, в которой источники энергии являются элементами нулевого ранга, распределители или устройства защиты — элементами первого ранга и приводы, обслуживающие выходные функции, — элементами второго ранга.

Система считается отказавшей в том случае, когда одна из ее функций оказалась невыполненной.

На рис. 1 показана схема системы, состоящей из $n$ независимых подсистем, обслуживающих $m$ выходов системы. Каждая подсистема содержит источник энергии ($Э_i$), снабжающий через УЗ соответствующие приводы.

Примем, что:

закон распределения времени безотказной работы элементов системы произволен;

все подсистемы находятся в одинаковых условиях эксплуатации;

при отказе элементов режим работы остальных не изменяется;

ремонт отказавших элементов в полете невозможен.

Система непременно отказывает, если нарушается снабжение энергией потребителей всех подсистем вследствие отказов источников энергии или энергетических отказов потребителей, сопровождаемых неотключением их соответствующими УЗ. На основании принятых допущений эти отказы являются независимыми,

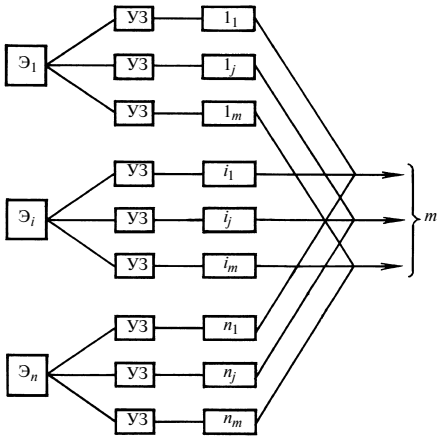



**Рис. 1**

поэтому вероятность рассматриваемой ситуации $Q_1 \approx [q_э + \sum_{j=1}^{m} q_{УЗ}\left(q_{УЗэ} + \sum_{\xi=1}^{k_j} \alpha_\xi q_\xi\right)]^n \approx q^n_{э\Sigma}$, где $q_э$ — вероятность отказа источника энергии, $m$ — число выходов системы.

Если отказывают не все подсистемы вследствие их энергетических отказов, то отказ системы возможен вследствие:

1) ложных срабатываний УЗ во всех работоспособных подсистемах;

2) энергетических отказов потребителей любого выхода системы во всех работоспособных подсистемах, сопровождаемых срабатыванием соответствующих УЗ;

3) функциональных отказов потребителей любого выхода во всех работоспособных подсистемах.

Вероятность появления этих ситуаций

$$Q_2 = \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n q^i_{э\Sigma} (1 - q_{э\Sigma})^{n-(i+1)} \times \sum_{\varphi=1}^{3} Q(Q_\varphi/Q_i),$$

где $Q(Q_\varphi/Q_i)$ — вероятность появления одной из трех перечисленных ситуаций:

$$Q(Q_1/Q_i) = \sum_{j=1}^{m} q^{n-1}_{фУЗ};$$

$$Q(Q_2/Q_i) = (1 - q_{УЗ})^{n-i} \times \sum_{j=1}^{m} \sum_{\xi=1}^{k} (q_{УЗэ} + \alpha_\xi q_\xi)^{n-i};$$

$$Q(Q_3/Q_i) = \sum_{j=1}^{m} \sum_{\xi=1}^{k} [(1 - \alpha_\xi) q_\xi]^{n-i}.$$

Учитывая, что вероятность появления любого отказа значительно меньше 1, и пренебрегая вероятностями одновременного появления вышеперечисленных ситуаций, определим

$$Q_2 \approx \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n q^i_{э\Sigma} \left\{ \sum_{j=1}^{m} q^{n-1}_{УЗф} + \sum_{j=1}^{m} \sum_{\xi=1}^{k_j} (q_{УЗэ} + \alpha_\xi q_\xi)^{n-i} + \sum_{j=1}^{m} \sum_{\xi=1}^{k_j} [(1 - \alpha_\xi) q_\xi]^{n-i} \right\}.$$

В результате получим вероятность отказа системы:

$$Q \approx q^n_{э\Sigma} + \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n q^i_{э\Sigma} \left\{ \left\{ \sum_{j=1}^{m} \left\{ q^{n-i}_{УЗф} + \left[ \sum_{\xi=1}^{k_j} (q_{УЗэ} + \alpha_\xi q_\xi) \right]^{n-i} + \sum_{\xi=1}^{k_j} [(1 - \alpha_\xi)^{n-i} q_\xi] \right\} \right\} \right\}, \quad (1)$$

где $q_{э\Sigma} = q_э + \sum_{j=1}^{m} q_{УЗ}\left(q_{УЗэ} + \sum_{\xi=1}^{k_j} \alpha_\xi q_\xi\right)$.

Полагая для простоты анализа вероятности отказа потребителей одинаковыми и равными $q$ и введя коэффициенты $k$ отказов элементов, равные отношению вероятности их отказа к вероятности отказа потребителя, получим:

$$Q = q^n \left\{ \left\{ k^n_{э\Sigma} + \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n k^i_{э\Sigma} m \{ k^{n-1}_{УЗф} + k_j[(k_{УЗэ} + \alpha)^{n-i} + (1 - \alpha)^{n-i}] \} \right\} \right\}.$$

Замечательно, что эта зависимость позволяет не только определить вероятность отказа системы, но, что еще более важно, и оценить эффективность различных мероприятий по обеспечению надежности и выбору оптимального варианта системы без знания вероятностей отказов элементов. В большинстве случаев эти вероятности невозможно определить из-за отсутствия необходимой для достоверной оценки статистики отказов, в том числе из-за проведения после каждого из отказов необходимых доработок. Эффективность мероприятий по повышению надежности достаточно просто можно оценить определением выигрыша надежности

$$\bar{Q} = \frac{Q_0}{Q_{вар}} - 1, \quad (2)$$

где $Q_0$ и $Q_{вар}$ — вероятности отказов исходной системы и оцениваемого варианта.

Оценим, например, эффективность применения УЗ. Вероятность отказа исходной системы без УЗ оп-

ределим, подставив в формулу (1) значения $q_{УЗ} = 1$; $q_{УЗэ} = q_{УЗф} = 0$:

$$Q_0 \approx q^n \left\{ k_{э\Sigma}^n + \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n k_{э\Sigma}^i mk_j[\alpha^{n-i} + (1-\alpha)^{n-i}] \right\},$$

где $k_{э\Sigma} = k_э + mk_j\alpha$.

Вероятность отказа рассматриваемой системы с УЗ определим, полагая УЗ идеальными ($q_{УЗ} = q_{УЗэ} = q_{УЗф} = 0$), так как анализ современных их конструкций и опыт испытаний показывают, что их ложные срабатывания практически невероятны, вероятность энергетического отказа ничтожна по сравнению с приводом, а несрабатывания также крайне маловероятны.

Итак,

$$Q_{вар.\ УЗ} \approx q^n\{k_э^n + \sum_{i=0}^{n-1} C_i^n k_э^i mk_j[\alpha^{n-i} + (1-\alpha)^{n-i}]\}.$$

Очевидно, что при подстановке этих выражений в формулу (2) выигрыша надежности вероятности отказа потребителей ($q^n$) сократятся. Таким образом, выигрыш надежности от применения УЗ не зависит от абсолютных значений вероятностей отказов элементов системы, т. е. от уровня развития техники, и определяется лишь структурой системы и относительной надежностью ее элементов (коэффициентами отказов). Коэффициенты отказов элементов можно оценить путем анализа их сложности, считая, что коэффициент сложности элемента равен отношению его сложности к сложности привода с управляющими и соединительными элементами.

В качестве иллюстрации влияния параметров системы на ее надежность рассмотрим наиболее простые варианты системы выпуска шасси самолета с тремя опорами ($m = 3$), состоящей из основной и аварийной подсистем ($n = 2$). Для выпуска каждой из опор требуется от одного до трех гидроприводов ($k_j = 1 \div 3$), подключенных к идеальным ($k_э = 0$) или реальным ($k_э = 1$) источникам энергии через устройства защиты или без них.

На рис. 2 показаны графики выигрыша надежности от применения УЗ в функции доли энергетических отказов гидропривода:

1) в системе с реальными источниками энергии и одним гидроприводом каждой опоры ($k_э = 1$, $k_j = 1$);

2) в системе с реальными источниками энергии и тремя гидроприводами каждой опоры ($k_э = 1$, $k_j = 3$);

3) в системе с идеальными источниками энергии и одним гидроприводом каждой опоры ($k_э = 0$, $k_j = 1$).

Из графиков видно, что выигрыш надежности от применения УЗ в системе ($k_э = 1$, $n = 2$, $m = 3$, $k_j = 3$) с тремя опорами шасси, в каждой из которых содержится по три гидропривода в основной и аварийной системах, равен примерно 4, т. е. система с УЗ не менее чем в 5 раз надежнее системы без УЗ. Следует отметить, что применение УЗ даже в простейшей системе, содержащей всего по одному гидроприводу на каждой опоре в основной и аварийной системах, увеличивает ее безотказность примерно в 2,5 раза. Если при этом повысить надежность источников энергии, например, путем применения УЗ и для других обслуживаемых ими систем, то увеличение безотказности выпуска может повыситься еще в несколько раз.

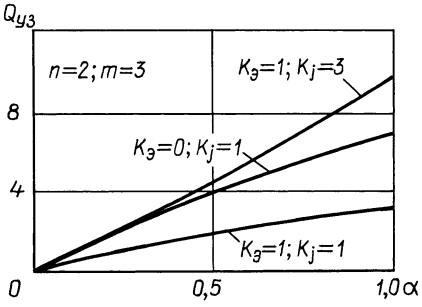



**Рис. 2**

Таким образом, применение УЗ является эффективным средством повышения надежности систем, учитывая при этом небольшие габаритные размеры, массу и стоимость УЗ по сравнению с обслуживаемыми ими приводами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Раздобарин А. М., Шилов Ю. Л.** Проблемы обеспечения живучести боевых самолетов и вертолетов // Техинформация НАГИ. № 18. 1978.
2. **Бойцов Б. В.** Надежность шасси самолета. М.: Машиностроение, 1976.
3. **Техническая** эксплуатация летательных аппаратов / Под ред. А. И. Пугачева. М.: Транспорт, 1977.
4. **Cornell C. E.** Safety analysis tool or trap? // Space aeronaut. 1969. N 5. V. 52.
5. **Нейман Дж.** Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонентов // Автоматы. М.: Мир, 1967.
6. **Мур Э. Ф., Шеннон К. Э.** Надежные схемы из ненадежных реле // Кибернетический сборник № 2. М.: Изд-во иностр. лит. 1960.



**ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!**

**Правила подготовки рукописей смотрите в №1 за 2008 г. на третьей странице обложки.**

УДК 621.22

Н. Г. ГРИНЧАР, канд. техн. наук (Московский ГУ путей сообщения)

# Анализ изменения состояния гидропривода мобильных машин в процессе эксплуатации

Рассмотрен вопрос прогнозирования сроков службы гидравлических систем и агрегатов строительных и других мобильных машин с учетом внедрения системы диагностики. Приведены зависимости изменения объемного КПД некоторых систем и агрегатов в процессе эксплуатации.

Комплексы организационно-технических мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту, проводимые в плановом порядке, объединяются в единую планово-предупредительную систему. Очевидно, что минимум экономических затрат будет получен в том случае, когда применяемая система технического обслуживания (ТО) и планово-предупредительных ремонтов (ППР) обеспечивает достаточно близкое соответствие планируемых сроков выполнения ремонтных работ и времени возникновения действительной необходимости в них, с одной стороны, и соответствие объемов ППР фактически требующимся объемам ремонта, с другой стороны [1]. В противном случае неизбежны дополнительные расходы, связанные с внеплановыми ремонтами и завышенными объемами плановых ремонтов.

При действующей системе ППР, как правило, заложена такая периодичность ТО и ППР, которая предусматривает полное использование ресурса примерно в 10 % случаев, а в остальных 90 % ремонт проводится досрочно. Опыт эксплуатации строительных и путевых машин показывает, что учет таких показателей, как наработка на отказ, расход горючесмазочных материалов (ГСМ), запасных частей и т. п., позволяет корректировать время постановки машин на ремонт [1], увеличивая при этом их срок службы. На рис. 1 показана обобщенная картина зависимости затрат на поддержание надежности машин от периодичности обслуживания и наработки $t$.

Рассмотрим периодичность обслуживания гидроприводов машин в соответствии с ППР без применения средств диагностики. Основным параметром, характеризующим изменение технического состояния гидропривода в целом и его элементов, является объемный КПД. [2, 3]. На рис. 2, *а*, показано изменение объемного КПД гидропривода для группы машин при ТО или ремонте с установленной периодичностью без применения средств технической диагностики (ТД). При системе ППР обслуживание всех машин должно проводиться каждый раз через одинаковые периоды наработки $t_1 = t_2 = t_3 = ... = t_n$, при которых есть незначительная вероятность появления отказа хотя бы какого-то одного элемента.

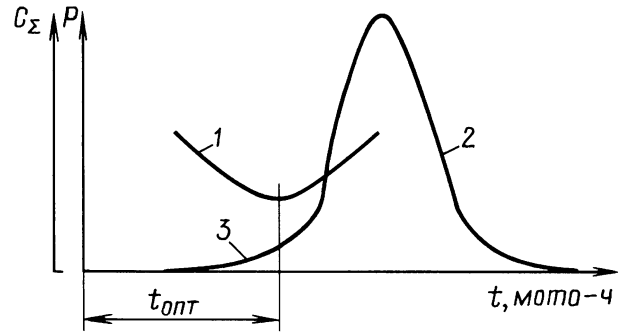



**Рис. 1. Суммарные затраты $C_\Sigma$ на ТО и ремонты парка машин (*1*); распределение *P* сроков службы основных агрегатов гидропривода (*2*); внеплановые ремонты (в зависимости от периодичности ППР) (*3*):**
$t_{опт}$ — оптимальный срок проведения ТО или ремонта

Обслуживание и ремонт, назначаемые с учетом ТД, предусматривают проводимые через определенные периоды $t_i$ диагностические операции. В технической документации при этом должны указываться значения объемного КПД и других параметров состояния гидропривода, при которых возможна безотказная эксплуатация до следующего контроля. Реализация такого обслуживания показана на рис. 2, *б*.

Очевидно, что в момент $t_1$ первой проверки параметр $\eta$ одной машины достиг $\eta_{пред}$ и есть еще одна машина, у которой остаточный ресурс $t_{o1} < t_2$. Эти машины подлежат ремонту. В момент $t = t_1 + t_2$ значения объемного КПД еще одной машины меньше $\eta_д$, а так как ее остаточный ресурс $t_{o2} < t_3$, то она подлежит ремонту и т. д.

Таким образом, контрольно-профилактическое обслуживание и ремонт машины с применением ТД характеризуется тем, что за счет более полного использования поля допуска на отклонение параметра состояния и проведения диагностики увеличивается доля полной реализации ресурса элементов машины.

Статопараметрический метод диагностирования предполагает, что основными диагностическими параметрами гидропривода и его элементов являются объемные потери рабочей жидкости и КПД — общий и объемный — при нормированных давлении и температуре. Если в системе привода не развивается заданное давление, она однозначно относится к неисправным и подлежит ремонту.

Модель изменения диагностического параметра базируется на данных статистики изменения объемного КПД в процессе эксплуатации. Экспериментальные зависимости изменения объемного КПД являются параболами. В работе [3] предлагается определять параметры функции $\eta = f(t)$, исходя из предположения, что она квадратична:

$$\eta = at^2 + b. \quad (1)$$

Физический смысл выражения (1) сводится к следующему: темп падения объемного КПД является величиной возрастающей, что объясняется накоплением продуктов изнашивания и абразивных материалов в рабочей жидкости, с одной стороны, и увеличением сил трения и соударения в прецизионных парах, с другой.

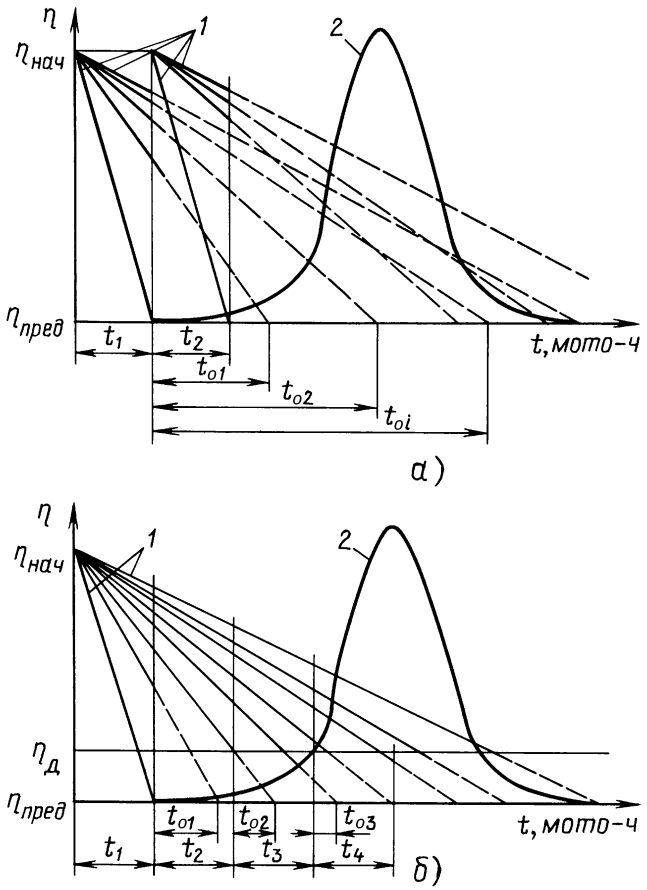



**Рис. 2. Зависимости объемного КПД гидропривода (*1*) и плотность распределения его наработки до отказа (*2*) для группы путевых машин:**
*а* — при периодичности ТО, установленной без применения ТД; *б* — при контрольно-профилактическом ТО с применением средств ТД; $\eta_{нач}$, $\eta_д$ и $\eta_{пред}$ — номинальное (начальное), допустимое и предельное значения объемного КПД; $t_i$ — периодичность ТО или ППР (*а*) и периодичность проведения контрольно-профилактических осмотров (*б*); $t_{oi}$ — остаточный ресурс гидроагрегата

Для небольших отрезков времени характер изменения объемного КПД удовлетворительно описывается линейной зависимостью [4]. Допустим, что определены $\eta_1$ в момент $t_1$ и $\eta_2$ в момент $t_2$. Отношение $\eta' = (\eta_1 - \eta_2)/(t_2 - t_1)$ назовем средней скоростью изменения η на временно́м интервале $t_1 \div t_2$. Если предположить, что эта скорость сохраняется и в дальнейшем, на протяжении некоторого отрезка времени $\tau \ll (t_2 - t_1)$, то можно предсказать значения объемного КПД, которое после τ часов наработки составит $\eta(t_i + \tau) = \eta_i - \eta'\tau$.

Как показывает опыт, для малых интервалов времени τ рассмотренное допущение справедливо (примерно для интервала 240 ÷ 300 ч наработки по мотосчетчику машины). Для группы машин зона снижения объемного КПД будет, очевидно, ограничена кривыми $\eta_1 = -A_1t^2 + B$; $\eta_2 = -A_2t^2 + B$, где $B$ — начальное значение объемного КПД.

Для определения конкретных значений параметров зависимостей необходимы следующие данные: минимальное и максимальное время наработки до предельного состояния, начальное и предельное значения объемного КПД. При этом за начальное значение диагностического параметра $B$ можно, очевидно, принять для отдельных аппаратов гидропривода их паспортные данные, так как для новых аппаратов их разброс незначителен и им можно пренебречь, а для отдельной группы аппаратов параметр

$$B = \prod_{i=1}^{n} B_i .$$

Данные, полученные в ходе исследований по этой тематике на кафедре "Путевые, строительные машины и робототехнические комплексы" Московского ГУ путей сообщения (МИИТ), сведены в таблицу. Некоторые зависимости представлены на рис. 3 *а*, *б*.

Используя полученные данные о характере изменения технического состояния гидропривода (в данном случае о характере падения объемного КПД), можно с

**Параметры изменения объемного КПД гидроприводов**

| Гидроаппараты | Одноковшовые экскаваторы | | Дорожно-строительные машины | | Путевые машины | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\frac{A_{max} \div A_{min}}{A_{ср}} \cdot 10^{-6}$ | $B$ | $\frac{A_{max} \div A_{min}}{A_{ср}} \cdot 10^{-6}$ | $B$ | $\frac{A_{max} \div A_{min}}{A_{ср}} \cdot 10^{-6}$ | $B$ |
| Приводы вращения | $\frac{0{,}012 \div 0{,}065}{0{,}0385}$ | 0,895 | $\frac{0{,}070 \div 1{,}40}{0{,}735}$ | 0,87 | $\frac{0{,}0684 \div 0{,}312}{0{,}127}$ | 0,875 |
| Приводы поступательного движения | $\frac{0{,}008 \div 0{,}050}{0{,}029}$ | 0,94 | $\frac{0{,}050 \div 1{,}30}{0{,}675}$ | 0,91 | $\frac{0{,}076 \div 0{,}304}{0{,}1353}$ | 0,92 |
| Аксиально-поршневые гидромашины | $\frac{0{,}00395 \div 0{,}0283}{0{,}01612}$ | 0,95 | $\frac{0{,}029 \div 0{,}103}{76}$ | 0,95 | $\frac{0{,}0066 \div 0{,}088}{0{,}0163}$ | 0,95 |
| Шестеренные насосы, лопастные насосы | $\frac{0{,}055 \div 0{,}22}{0{,}091}$ | 0,92 | $\frac{0{,}037 \div 1{,}16}{0{,}598}$ | 0,92 | $\frac{0{,}053 \div 0{,}249}{0{,}098}$ | 0,93 |
| Гидроцилиндры | $\frac{0{,}00088 \div 0{,}0505}{0{,}02569}$ | ≈1,0 | $\frac{0{,}003 \div 0{,}01}{6{,}5}$ | ≈1,0 | $\frac{0{,}0012 \div 0{,}05}{0{,}0037}$ | ≈1,0 |
| Распределители | $\frac{0{,}00343 \div 0{,}01236}{0{,}007895}$ | 0,99 | $\frac{0{,}0101 \div 0{,}022}{0{,}1165}$ | 0,99 | $\frac{0{,}0021 \div 0{,}0044}{0{,}00297}$ | 0,99 |

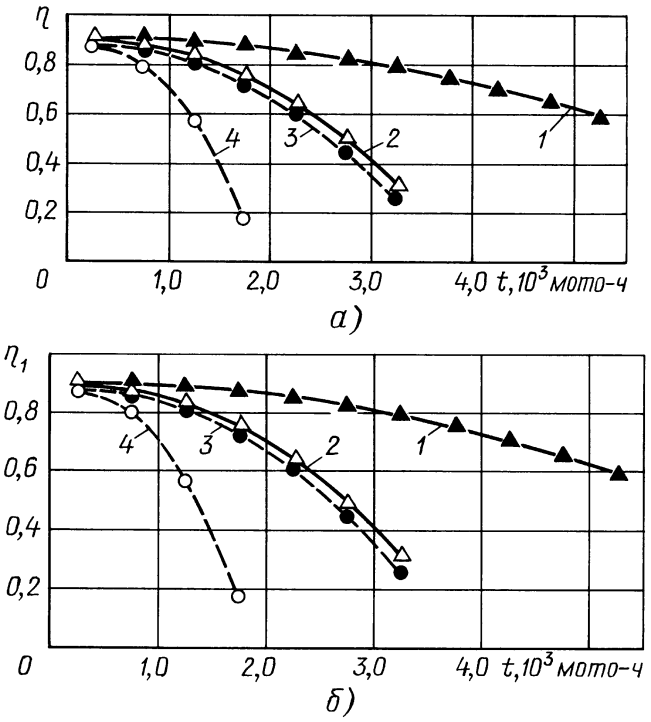



**Рис. 3. Максимальные (*1*, *3*) и минимальные (*2*, *4*) изменения объемного КПД:**
*а* — привода вращения; *б* — привода поступательного действия; *1*, *2* — для экскаваторов; *3* и *4* — для путевых машин

достаточной уверенностью предсказать, что величина параметра — объемного КПД — достигнет предельного значения с вероятностью $P = 0{,}9973$ на участке от $t_1$ до $t_2$, как это представлено на рис. 4. Зона снижения объемного УПД будет в этом случае ограничена линиями $K_1$ и $K_2$. Так как на снижение η влияет множество эксплуатационных факторов объективного и субъективного характера, будем считать закон распределения вероятности времени наработки до предельного состояния нормальным.

Тогда математическое ожидание времени наработки и среднее квадратичное отклонение будут:

$$\bar{t} = (t_1 + t_2)/2;\ \sigma = (\bar{t} - t_1)/3.$$

Функция распределения плотности вероятности на участке от $t_1$ до $t_2$

$$f_1(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}\right].$$

Проведя в момент $t'$ диагностику гидропривода, можем установить реальное значение η в момент $t'$. Тогда вероятная зона снижения объемного КПД будет ограничена линиями $K_1'$ и $K_2'$. Соответственно, изменятся значения $t_1$, $t_2$, $t$, σ, $f_2(t)$. Получим: $\bar{t}' = (\bar{t}_1' + \bar{t}_2')/2$; $\sigma' = (\bar{t}' - \bar{t}_1')/3$; $f_2(t) = \dfrac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \exp\left[\dfrac{(t-\bar{t}')^2}{2\sigma'^2}\right]$.

Следовательно, на участке $\Delta t = t_1' - t_1$ с вероятностью $P(t) = 0{,}9973$ можно предсказать безотказную работу привода (если считать отказом достижение объемным КПД предельного значения).

Проведя в момент $t''$ повторное диагностирование, мы еще более сузим зону, в которой параметр η достигнет предельного значения с соответствующей вероятностью. Соответственно, получим значения $t_1''$, $t_2''$, $t''$, σ'', $f_3(t)$, согласно которым можно предсказать безотказную работу гидропривода на участке $\Delta t = t_1'' - t_1$.

Последующее диагностирование позволит еще точнее определить интервал времени, когда следует ожидать отказа гидропривода с соответствующей вероятностью. В большинстве случаев увеличение ресурса составляет около 50 %. Правильно поставленное диагностирование позволяет повысить коэффициент готовности машин до 0,92 и снизить объем ремонтных работ на 30 % [3, 4].

Рассмотренный подход к прогнозированию долговечности гидроагрегатов позволяет перейти от жесткой планово-предупредительной системы замены элементов гидропривода к системе, учитывающей фактическое техническое состояние агрегатов, и может быть использован и в качестве методической основы для оценки эффективности профилактической диагностики для некоторого парка (группы) машин.

Пусть для определенной группы машин при некотором распределении зона снижения КПД ограничена линиями, показанными на рис. 5: $\eta^{max} = f_1(t)$; $\eta^{min} = f_2(t)$. Проведя в момент $t$ диагностику гидропривода машины, мы получим некоторое распределение значений η, ограниченное интервалом $\eta_1^{max} - \eta_1^{min}$.

Допустим, что $\varphi(\eta_1/t)$ есть плотность вероятности распределения по $\eta_1$ в момент $t$. Задачу можно сформулировать таким образом: определить математическое ожидание увеличения времени наработки гидропривода до предельного состояния для группы машин при известном распределении $\varphi(\eta/t)$ в момент $t$. Для этого необходимо определить математическое ожидание значения:

$$M[\Delta t_{min}] = M[t_{1min} - t_{0min}]. \quad (2)$$

Если характер изменения η не меняется с течением времени, то $t = f^{-1}(\eta)$. Тогда можно записать:

$$t_{1min} - t = f_2^{-1}(\eta_{min} - \eta_1 + C). \quad (3)$$

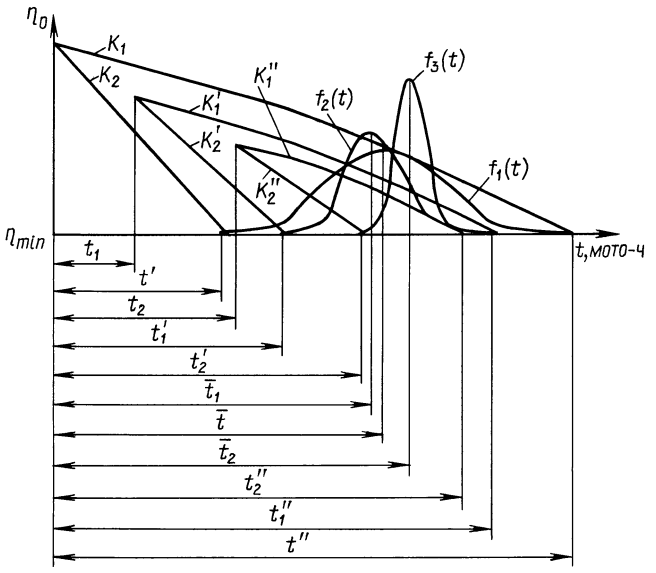



**Рис. 4. Схема прогнозирования ресурса гидросистемы по результатам диагностирования**

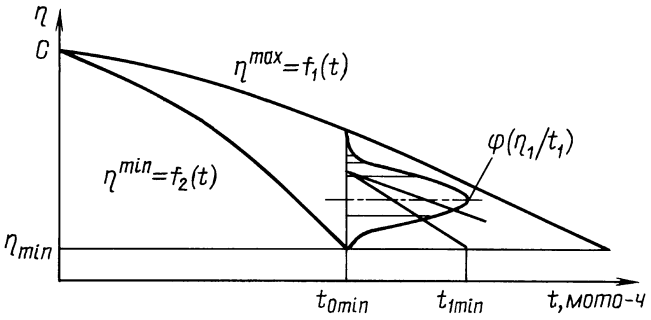



**Рис. 5. Схема прогнозирования ресурса гидросистемы для группы машин**

Из формулы (2) с учетом выражения (3) имеем:

$$M[t_{1\min} - t_{0\min}] = M[t_{1\min}] - M[t_{0\min}] =$$
$$= M[f_2^{-1}(\eta_{\min} - \eta_1 + C)] - M[t_{0\min}] + M[t_1].$$

Но так как $M[t_{0\min}] = t_{\min}$ и $M[t_1] = t_1$, то получаем:

$$M[f_2^{-1}(\eta_{\min} - \eta_1 + C] - t_{0\min} + t_1 =$$
$$= \int_0^\infty f_2^{-1}(\eta_{\min} - \eta_1 + C)\varphi(\eta_1/t_1)d\eta_1 - t_{0\min} + t_1.$$

Окончательно имеем:

$$M[\Delta t] = \int_0^\infty f_2^{-1}(\eta_{\min} - \eta_1 + C)\varphi(\eta_1/t_1)d\eta_1 - t_{0\min} + t_1.$$

Зная характер распределения по $\eta$ в момент $t$ диагностирования (а он должен быть близок к $t_{0\min}$), можно определить математическое ожидание увеличения гарантированного ресурса для группы машин.

Приравнивая $t_1 = t_{0\min}$, получаем:

$$M[\Delta t] = \int_0^\infty f_2^{-1}(\eta_{\min} - \eta_1 + C)\varphi(\eta_1/t_1)d\eta_1. \quad (4)$$

Зная математическое ожидание увеличения наработки для группы машин, можно определить ожидаемую экономическую эффективность от внедрения системы диагностики. Для этого необходимо в выражение (4) подставить значения функции $\eta = f(t)$. Если $\eta_{\min} = A_1t^2 + B$, то

$$t = \frac{1}{A_1}\sqrt{\eta_{\min} - B}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в формулу (4), получаем:

$$M[\Delta t] = \frac{1}{A_1}\int_{\eta_{\min}(t_1)}^{\eta_{\max}(t_1)} \sqrt{\eta_{\min}(t_1) - \eta_{\min}}\,\varphi(\eta/t)d\eta.$$

Для определения численных значений $M[\Delta t_{\min}]$ необходимо знать характер $\varphi(\eta/t)$, что требует большого объема статистических наблюдений. Имеющиеся данные не противоречат, однако, допущению о равномерной плотности распределения. Тогда

$$\varphi(\eta/t) = \frac{1}{\eta_{\max}(t_1) - \eta_{\min}(t_1)} = K.$$

Как показывает численный анализ, проводя регулярное техническое обследование гидропривода машин и оценивая полученные данные, можно увеличить эксплуатационный ресурс в среднем на 50 ÷ 60 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ким Б. Г.** Повышение готовности парков строительных машин путем совершенствования системы технической эксплуатации // Дис. ... д-ра техн. наук. Владимир, 1996. 350 с. Машинопись.
2. **Гринчар Н. Г.** Разработка системы бортовой диагностики гидроприводов бурильных машин транспортного строительства // Дис. ... канд. техн. наук. М.: 1990. 237 с. Машинопись.
3. **Харазов А. М.** Техническая диагностика гидроприводов машин. М.: Машиностроение, 1979. 112 с.
4. **Петров И. В.** Диагностирование дорожно-строительных машин. М.: Транспорт, 1980. 144 с.

УДК 621.81.001.24

Д. В. ВИХРЕНКО (МАЗ, г. Минск)

# Расчетно-экспериментальный метод оценки долговечности деталей сложной конфигурации с концентраторами напряжений

Предложен способ оценки долговечности сложной формы с концентраторами напряжений на основе расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов с определением зоны максимальных напряжений, а также расчет долговечности с учетом градиента напряжений по образцам, выполненным по технологии изготовления основной детали.

Детерминированный расчет долговечности деталей ведется в большинстве случаев по известной степенной зависимости Басквина:

$$N = N_0\left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{RN}}\right)^m, \quad (1)$$

где $N$ — искомая долговечность; $N_0$ — число циклов до перелома кривой усталости; $\sigma_R$ — предел выносливости материала при соответствующем коэффициенте асимметрии $R$; $\sigma_{RN}$ — действующее напряжение; $m$ — показатель степени наклона кривой усталости.

Помимо приведенной выше зависимости, существуют и другие зависимости, например трехпараметрическое уравнение Е. К. Почтенного [1]:

$N = N_0\exp\left(-\frac{\sigma_{RN} - \sigma_R}{\nu}\right)$, где $\nu$ — характеристика наклона кривой усталости в полулогарифмической системе координат.

И в том и в другом случае используют зависимость долговечности от действующих напряжений относительно некоторого базового числа циклов при соответствующем значении предела выносливости, которое определяют, как правило, исследуя гладкие цилиндрические образцы, подвергаемые изгибу с вращением.

Однако при расчете долговечности реальных деталей необходимо учитывать ряд факторов, которые значительно влияют на сопротивление усталости. Так, согласно ГОСТ 25.504—82 [2] значения предела выносливости детали необходимо определять с учетом коэффициента снижения предела выносливости: $K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1\right)\frac{1}{K_\nu K_A}$, где $K_\sigma$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений; $K_{d\sigma}$ — коэффициент, учитывающий размеры детали; $K_{F\sigma}$ — коэффициент влияния шероховатости поверхности; $K_\nu$ — коэффициент влияния поверхностного упрочнения; $K_A$ — коэффициент анизотропии.

Все перечисленные коэффициенты определены для ряда типовых поверхностных обработок и таких деталей, как валы с галтелями и выточками, пластины с отверстиями и вырезами и т. п. (их значения приводятся в специальной литературе).

Таким образом, зависимость (1) принимает вид:

$$N_{\text{дет}} = N_0\left(\frac{\sigma_R}{K\sigma_{R\text{ном}}}\right)^m, \qquad (2)$$

где $\sigma_{R\text{ном}}$ — номинальные напряжения в детали, определяемые испытаниями либо известными в сопротивлении расчетными методами материалов без учета концентрации напряжений (рис. 1).

Таким образом, при расчете долговечности проектируемой детали необходимо определить номинальные напряжения и ряд уточняющих коэффициентов. Однако не всегда рассчитываемые детали подпадают под существующую классификацию, а расчет на основании метода сопротивления материалов дает достоверную информацию о распределении напряжений.

В качестве примера рассмотрим такую деталь автомобиля, как картер ведущего моста. Под действием статической вертикальной нагрузки при аналитическом расчете по балочной теории сопротивления материалов

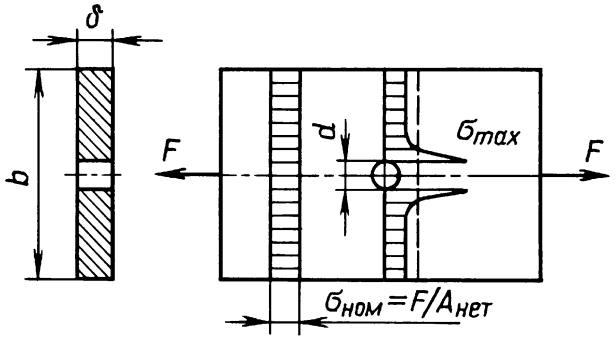



**Рис. 1. Схема концентрации напряжений в пластине с отверстием**

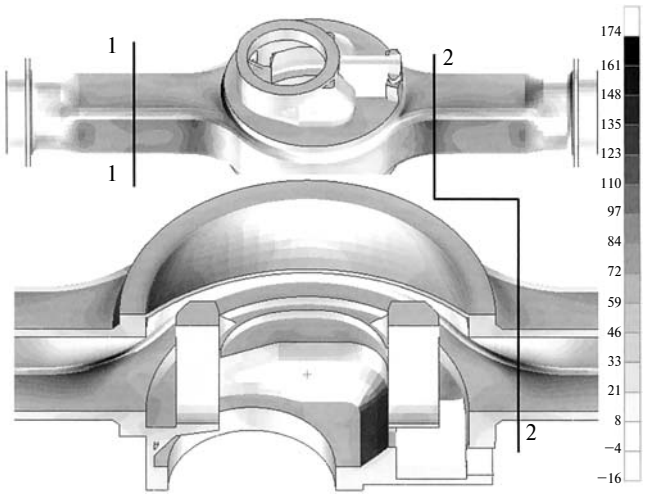



**Рис. 2. Распределение напряжений в картере ведущего моста автомобиля**

опасным является сечение в зоне установки рессор (рис. 2, сечение *1—1*). В этом случае для определения напряжений используем соотношение $\sigma_{\text{ном}} = M_{\text{изг}}/W$, где $M_{\text{изг}}$ и $W$ — соответственно изгибающий момент и момент сопротивления сечения.

По методу конечных элементов (МКЭ) получим, что максимальные напряжения возникают по радиусу скругления сечения (переход от рукавов к банджо) с внутренней стороны картера (рис. 2, сечение *2—2*), несмотря на то что по балочной теории в этой зоне напряжения должны снижаться из-за увеличения момента сопротивления сечения при неизменном изгибающем моменте. При этом разница между номинальными и максимальными напряжениями существенна. В данном случае $\sigma_{\max} = 2{,}6\sigma_{\text{ном}}$. Более того, определить наиболее опасную зону и напряжения в ней методом сопротивления материалов с учетом коэффициента концентрации невозможно. Поэтому необходимо создать общий метод расчета характеристик сопротивления усталости, основанный на определении напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне концентратора расчетными методами (например, МКЭ), без расчета номинальных напряжений и дополнительных коэффициентов, разработанных только для частных случаев концентрации напряжений.

В данном случае целесообразно применить способ расчетно-экспериментального определения долговечности, при котором в качестве лабораторных образцов используют образцы, изготовленные по той же технологии, что и рассчитываемая деталь, и имеющие сопоставимый характерный размер (для картеров ведущих мостов и рам таким размером является толщина) (рис. 3). Таким образом, учитывается влияние состояния поверхности и технологии изготовления на предел выносливости. Эффективность такого подхода при изготовлении образцов подтверждает практика [1—4]. Были созданы программы для расчета долговечности, например программа Resurs, разработанная в НИРУП "Белавтотракторостроение" в рамках ГНТП "Белавтотракторостроение" [5], которые используют на МАЗе.

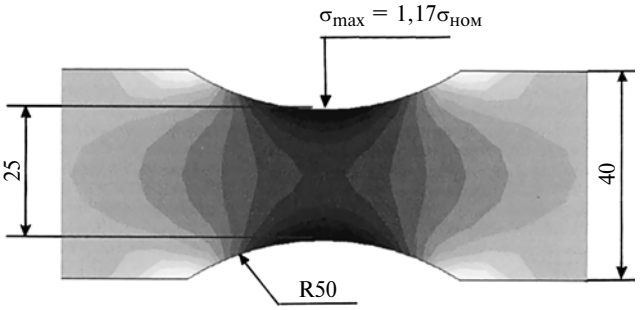



**Рис. 3. Распределение напряжений в образце при растяжении**

Однако этот способ не позволяет рассчитать такие детали с концентрацией напряжений, как приведенный выше картер ведущего моста. При попытке расчета по максимальным напряжениям получают значение, заниженное в десятки раз относительно прогнозируемого ресурса. Следовательно, необходимо выработать удобный способ учета концентрации напряжений для расчета долговечности именно по максимальным, а не по номинальным напряжениям.

Для этого перепишем уравнение (2) с заменой номинального напряжения на максимальное значение с учетом теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_{ном}$ и того, что из всех коэффициентов, входящих в коэффициент снижения предела выносливости, неучтенным остался только эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma$:

$$N_{дет} = N_0\left(\frac{\alpha_\sigma \sigma_R}{K_\sigma \sigma_{R\max}}\right)^m. \quad (3)$$

Исключим из уравнения два неизвестных коэффициента концентрации.

ГОСТ 25.504—82 рекомендует определять эффективный коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma$ несколькими способами. Самый простой из них — на основании коэффициента чувствительности материала к концентрации $q$:

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1). \quad (4)$$

При всей своей простоте этот способ не позволяет избавиться от двух неизвестных коэффициентов при подстановке выражения (4) в уравнение (3), к тому же этот способ определения эффективного коэффициента концентрации напряжений $K_\sigma$ считается неточным.

По методу Зибеля—Штилера эффективные коэффициенты концентрации напряжений для сталей с погрешностью до 20 % определяют по формуле

$$K_\sigma = \alpha_\sigma / n, \quad (5)$$

где $n = 1 + \sqrt{\overline{G}}\, 10^{-\left(0,33 + \frac{\sigma_т}{712}\right)}$ — коэффициент (здесь $\overline{G} = \frac{1}{\sigma_{\max}}\left[\frac{d\sigma}{dx}\right]_{x=a}$ — относительный градиент напряжений [6]).

Параметр $\overline{G}$ легко определить по результатам расчета НДС с помощью МКЭ, а следовательно, и коэффициент $n$. Таким образом, производя подстановку выражения (5) в уравнение (3), окончательно находим искомую долговечность: $N_{дет} = N_0[n\sigma_R/(\sigma_{R\max})]^m$.

Более точным считается метод определения эффективного коэффициента концентрации напряжений с учетом масштабного фактора (метод В. П. Когаева)[6]:

$$K_\sigma = \alpha_\sigma F(\theta, \nu_\sigma). \quad (6)$$

Здесь $F(\theta, \nu_\sigma) = \frac{2}{1 + \theta^{-\nu_\sigma}}$ — функция подобия, где $\theta = \frac{L/\overline{G}}{(L/\overline{G})_0}$ — относительный критерий подобия (здесь $L = 2t$ — периметр рабочего сечения образца или его часть, в точках которого действуют максимальные напряжения, $t$ — толщина стенок картера и образца, индекс 0 обозначает параметры образца); $\nu_\sigma$ — параметр уравнения подобия усталостного разрушения (при отсутствии опытных данных $\nu_\sigma = 0,19 - 0,000125\sigma_в$ при $\sigma_в < 1200$ МПа).

В этом случае подстановкой выражения (6) в уравнение (3) можно избавиться от неизвестных коэффициентов: $N_{дет} = N_0\left(\frac{\sigma_R}{F(\theta, \nu_\sigma)\sigma_{R\max}}\right)^m$.

Для расчета критерия подобия образца был проведен расчет его НДС при растяжении с помощью МКЭ, который показал, что у самого образца имеется концентрация напряжений $\alpha_{\sigma обр} = 1,17$ (см. рис. 3).

Расчет эффективного коэффициента концентрации для образца по методу Зибеля—Штилера показал, что результаты, полученные расчетным путем, фактически совпадают с теоретическими (разница менее 1 %). Поэтому предел выносливости, определенный на образце, при расчете долговечности картера следует увеличить с помощью коэффициента $\alpha_{\sigma обр}$. Кроме того, необходимо учесть вид нагружения — картер подвержен изгибу, в то время как образцы испытаны на растяжение—сжатие.

Пределы выносливости при растяжении—сжатии ($\sigma_{Rр}$) и изгибе ($\sigma_{Rи}$) связаны зависимостью [3] $\sigma_{Rр} = 0,75\sigma_{Rи}$.

Примем коэффициент перехода от изгиба к растяжению—сжатию $k_{и.р} = 0,75$. Тогда с учетом всех коэффициентов уравнение (3) примет вид:

$$N_{дет} = N_0\left(\frac{\alpha_{\sigma обр}\sigma_{R обр}}{k_{и.р} F(\theta, \nu_\sigma)\sigma_{R\max\ дет}}\right)^m. \quad (7)$$

Полученная формула (7) включает в себя только параметры, определяемые явным образом при расчете НДС детали с помощью МКЭ и испытаниях образцов, и не требует определения дополнительных коэффициентов и параметров.

**Пример.** Из расчета параметров, входящих в выражение (7): $\sigma_{0max дет} = 330$ МПа (расчет МКЭ при стендовом режиме нагружения моста силой в 190 кН); $\sigma_{0обр} = 193,5$ МПа при 90 % вероятности неразрушения; $L = 28$ мм; $G = 0,11$ мм$^{-1}$; $L_0 = 16$ мм; $\overline{G}_0 = 0,0356$ мм$^{-1}$;

$\theta = 0{,}56$; $\nu_\sigma = 0{,}129$; $F(\theta, \nu_\sigma) = 0{,}96$. Таким образом, при стендовом режиме нагружения получаем:

$$N_{\text{дет}} = N_0\left(\frac{1{,}17\sigma_{0\text{обр}}}{0{,}75 \cdot 0{,}96\sigma_{0\max\text{ дет}}}\right)^m = N_0\left(\frac{1{,}625\sigma_{0\text{обр}}}{\sigma_{0\max\text{ дет}}}\right)^m,$$

т. е. расчетный предел выносливости образца надо увеличить в 1,625 раза.

Расчет ресурса картера с такими параметрами с помощью программы Resurs показал, что его долговечность более 1 млн циклов нагружения. Это подтверждают стендовые испытания. Расчет ресурса без учета коэффициентов влияния концентрации показал долговечность в 186 тыс. циклов, т. е. в 6,6 раза меньше, что не соответствует действительности. Таким образом, предложенный метод позволяет достоверно оценить ресурс детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Почтенный Е. К**. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. Минск: Арти-Фекс, 2002. 186 с.
2. **ГОСТ 25.504—82.** Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Изд-во стандартов, 1982.
3. **Повышение** долговечности несущих конструкций карьерных автосамосвалов / П. Л. Мариев, А. К. Бернацкий, А. А. Ракицкий и др. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1991. 132 с.
4. **Оценка** сопротивления усталости штампосварного картера с использованием локальных моделей / Е. К. Почтенный, А. А. Ракицкий, Е. П. Рыжков и др.: Сер. физ.-техн. наук // Изв. АН БССР. 1988. № 1. С. 3—6.
5. **Разработка** программы расчета долговечности наиболее нагруженных зон рамы по результатам моделирования условий нагружения: Отчет НИРУП "Белавтотракторостроение". Минск: 2005. 35 с.
6. **Когаев В. П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.


---

УДК 519.711.2:534.08

С. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, А. В. ГОЛЬЦЕВ (Ростовский ГУ путей сообщения)

# Неразрушающий контроль трибосопряжений в условиях помех с применением линейной фильтрации сигнала акустической эмиссии

Значительная доля неисправностей машин и механизмов возникает вследствие выхода из строя узлов трения. Поэтому своевременное обнаружение дефектов в трибосопряжениях, прогнозирование износов и разрушений деталей являются весьма актуальными. Для этого разрабатывают технические средства и методы, позволяющие проследить динамику процесса трения, не нарушая трибоконтактов, т. е. методы неразрушающего контроля. На основе выявленных закономерностей определяют признаки изменения структуры, износ и разрушение материала. К таким методам относится и метод акустической эмиссии (АЭ) [1—4].

Анализ научных работ по акустической эмиссии трибосопряжений показал, что связь между параметрами сигналов АЭ и процессами, происходящими в зоне фрикционного контакта, до сих пор однозначно не определена. До настоящего времени не разработано единой математической модели АЭ. Это явление рассматривают с различных точек зрения (микро- и макроструктуры), с разной степенью детализации параметров и различным числом допущений [1—5].

С позиций наиболее эффективного использования определенный интерес вызывает феноменологическая модель АЭ, основанная на применении кинетической концепции прочности [5, 6], которая предполагает образование в зоне фрикционного контакта твердых тел ячеистой структуры, характеризуемой физико-механическими свойствами взаимодействующих поверхностей, в частности, геометрическими [7, 8]. Каждая ячейка структуры представляет собой некоторый объем материала и характеризуется критическим напряжением $\sigma$ разрыва. Все ячейки совершают термоактивированные колебания (флуктуации) относительно положения равновесия. Если кинетическая энергия колебаний ячейки превышает энергетический барьер разрыва, то она отрывается от поверхности, т. е. происходит отделение частицы износа. Разрушение каждой ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ, поэтому активность АЭ определяется числом ячеек, разрушаемых за единицу времени [5].

Следовательно, зная общее число ячеек в теле и измеряя активность АЭ, можно прогнозировать износ тела и, в конечном счете, момент его разрушения, т. е. определять долговечность $\tau$ тела.

В работе [5] приведена кинетическая модель разрушения трущихся поверхностей и формула для расчета числа ячеек, термоактивированно разрушаемых за единицу времени при линейно изменяющейся нагрузке:

$$\dot{N}_T = (N_0 - N_T)W,$$

где $N_0$ — число ячеек в начальный момент времени; $N_T$ — число разрушенных ячеек за определенный промежуток времени; $W = 1/\tau_1$ — вероятность разрыва ячейки прочностью $\sigma$ за единицу времени ($\tau_1$ — долговечность ячейки).

При испытаниях в качестве информативного параметра процесса разрушения чаще всего регистрируют число импульсов АЭ, т. е. параметр $N_T$. Затем вычисляют активность АЭ на каждом временном интервале и по изменению активности судят о степени разрушения тела.

Однако необходимо учитывать и то, что при наличии прецизионного датчика импульсов АЭ на его выходной сигнал существенное влияние оказывает форма импульса механического напряжения. С учетом этого на основании кинетической теории прочности была

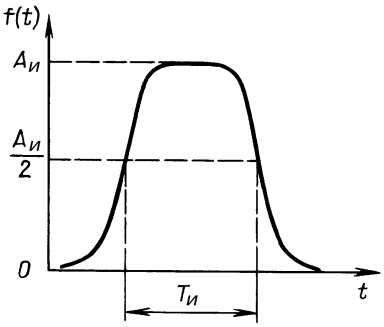



**Рис. 1. Форма одиночного импульса АЭ**

разработана структурная модель сигнала АЭ, излучаемого поверхностью твердого тела при трении. В качестве формы одиночного импульса напряжения принята зависимость изменения амплитуды $A_и$ напряжения от времени [1], приведенная на рис. 1. Данный импульс удобно аппроксимировать суммой гармонических составляющих, положив функцию $f(t)$ периодической. Эмпирически доказано, что для удовлетворительной аппроксимации можно ограничиться рассмотрением постоянной составляющей и первых четырех гармоник разложения Фурье импульса:

$$f^*(t) = A_0 - A_1\cos\omega_1 t + A_2\cos\omega_2 t + A_3\cos\omega_3 t - A_4\cos\omega_4 t,$$

где $A_i$ — амплитуда $i$-й гармоники ($i = 0, 1, ..., 4$); $\omega_1$, $\omega_2$, $\omega_3$, $\omega_4$ — циклические частоты гармоник, кратные $2\pi/T_и$.

Если разрушение одной ячейки инициирует одиночный импульс АЭ $f(t)$, то при разрушении $dN_T$ ячеек возникает импульс $dy(t) = dN_T f^*(t)$. Тогда суммарный сигнал от непрерывного разрушения множества ячеек на текущем интервале времени определяется выражением

$$y(t) = \int_0^t \dot{N}_T(t_1) f^*(t - t_1)\,dt_1, \qquad (1)$$

где $t_1$ соответствует моменту начала очередного импульса АЭ.

Полученная формула представляет собой интеграл Дюамеля, который может быть интерпретирован как функция отклика линейного динамического звена с импульсной переходной характеристикой $f^*(t)$ на входное воздействие $dN_T$. Такое звено-модель может быть описано системой линейных дифференциальных уравнений, для получения которых удобно перейти к операторным изображениям функций:

$$f^*(t) \to F(p);\ y(t) \to Y(p);\ \dot{N}_T(t) \to pN_T(p),$$

где $F(p) = \dfrac{A_0}{p} - \dfrac{A_1 p}{p^2 + \omega_1^2} + \dfrac{A_2 p}{p^2 + \omega_2^2} + \dfrac{A_3 p}{p^2 + \omega_3^2} - \dfrac{A_4 p}{p^2 + \omega_4^2}$ — передаточная функция звена-модели.

В этом случае интегралу (1) эквивалентно выражение

$$Y(p) = pN_T(p)F(p) = \frac{A_0 p N_T(p)}{p} - \frac{A_1 p^2 N_T(p)}{p^2 + \omega_1^2} + \frac{A_2 p^2 N_T(p)}{p^2 + \omega_2^2} + \frac{A_3 p^2 N_T(p)}{p^2 + \omega_3^2} - \frac{A_4 p^2 N_T(p)}{p^2 + \omega_4^2} = \sum_{i=0}^{4} Y_i(p). \qquad (2)$$

Из выражения (2) нетрудно получить систему линейных дифференциальных уравнений для составляющих выходного сигнала $y_i(t)$ звена—модели при подаче на вход функции $\dot{N}_T(t)$:

$$\begin{cases} \dot{y}_0(t) = A_0 \dot{N}_T(t); \\ \ddot{y}_1(t) = -A_1 \ddot{N}_T(t) - \omega_1^2 y_1(t); \\ \ddot{y}_2(t) = A_2 \ddot{N}_T(t) - \omega_2^2 y_2(t); \\ \ddot{y}_3(t) = A_3 \ddot{N}_T(t) - \omega_3^2 y_3(t); \\ \ddot{y}_4(t) = -A_4 \ddot{N}_T(t) - \omega_4^2 y_4(t); \\ \dot{N}_T(t) = W[N_0 - N_T(t)]; \\ \ddot{N}_T(t) = -W^2[N_0 - N_T(t)]. \end{cases} \qquad (3)$$

Переходя к оригиналам функций в выражении (2), можно записать:

$$y(t) = y_0(t) + y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t).$$

Поскольку для определения активности АЭ необходимо накопление сигнала во времени, регистрирующая аппаратура представляет собой приемник-интегратор. Следовательно, сигнал на выходе такого измерителя на интервале от 0 до $t$ описывается выражением

$$x(t) = \int_0^t [y_0(t) + y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t)]\,dt.$$

Сигнал, регистрируемый приемной аппаратурой, подвергается влиянию внешних и внутренних помех: внешние помехи, такие как вибрации и удары в узлах нагружающих устройств, являются низкочастотными и не вносят значительных искажений в информативную высокочастотную часть спектра сигнала; внутренние помехи, обусловленные тепловыми и электрическими шумами аппаратуры, являются высокочастотными и искажают информативные параметры сигнала АЭ. Таким образом, сигнал на выходе интегратора можно записать как $z(t) = x(t) + \eta(t)$, где $\eta(t)$ — шум интегратора.

Рассматриваемая модель сигнала АЭ относится к классу стохастически наблюдаемых, в узком смысле, систем [9, 10], так как первичный сигнал является детерминированным, а измеряемый сигнал искажен шумами. Для оценки состояния данной модели целесообразно применить алгоритм линейного оптимального оценивания (фильтрации). В частности, для решения поставленной задачи удобно использовать один из наиболее простых и распространенных алгоритмов — фильтр Калмана—Бьюси [10—12]. Для этого предварительно проинтегрируем по времени уравне-

ния системы (3) для составляющих сигнала $y_1(t)$ на интервале от 0 до $t$:

$$\begin{cases} y_0(t) = A_0 N_T(t); \\ \dot{y}_1(t) = -A_1 \dot{N}_T(t) - \omega_1^2 \int\limits_0^t y_1(t)dt; \\ \dot{y}_2(t) = A_2 \dot{N}_T(t) - \omega_2^2 \int\limits_0^t y_2(t)dt; \\ \dot{y}_3(t) = A_3 \dot{N}_T(t) - \omega_3^2 \int\limits_0^t y_3(t)dt; \\ \dot{y}_4(t) = -A_4 \dot{N}_T(t) - \omega_4^2 \int\limits_0^t y_4(t)dt. \end{cases} \quad (4)$$

Приведем уравнения (4) к форме Коши, выполнив следующую замену:

$y_0(t) = \dot{x}_0(t)$; $y_i(t) = x_i(t)$; $\dot{x}_j^*(t) = x_i(t)$, получим:

$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = A_0 N(t); \\ \dot{x}_1^*(t) = x_1(t); \\ \dot{x}_1(t) = -A_1 W[N_0 - N_T(t)] - \omega_1^2 x_1^*(t); \\ \dot{x}_2^*(t) = x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) = A_2 W[N_0 - N_T(t)] - \omega_2^2 x_2^*(t); \\ \dot{x}_3^*(t) = x_3(t); \\ \dot{x}_3(t) = A_3 W[N_0 - N_T(t)] - \omega_3^2 x_3^*(t); \\ \dot{x}_4^*(t) = x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) = -A_4 W[N_0 - N_T(t)] - \omega_4^2 x_4^*(t); \\ \dot{N}_T(t) = W[N_0 - N_T(t)]. \end{cases} \quad (5)$$

Запишем систему уравнений (5) в векторной форме: $\dot{X}(t) = AX(t) + \gamma$, где

$$X = [x_0\ x_1^*\ x_1\ x_2^*\ x_2\ x_3^*\ x_3\ x_4^*\ x_4\ N_T]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_1 W \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_2 W \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_3^2 & 0 & 0 & 0 & -A_3 W \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_4^2 & 0 & A_4 W \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W \end{bmatrix};$$

$$\gamma = [0\ \ 0\ -A_1 WN_0\ \ 0\ \ A_2 WN_0\ \ 0\ \ A_3 WN_0\ \ 0\ \ -A_4 WN_0\ \ WN_0]^T.$$

В этом случае $z(t) = x_0(t) + x_1^*(t) + x_2^*(t) + x_3^*(t) + x_4^*(t) + \eta(t)$ или $Z(t) = CX(t) + \eta(t)$, где $C = [1\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 0]$.

Тогда уравнение оптимального фильтра для оценки вектора полезного сигнала АЭ в условиях возмущенных измерений [10—12] примет вид:

$$\dot{\tilde{X}}(t) = A\tilde{X}(t) + B(t)[Z(t) - C\tilde{X}(t)] + \gamma,$$
$$\tilde{X}(t_0) = M(X_0) = \tilde{X}_0, \quad (6)$$

где $B(t) = R(t)C^{\mathrm{T}}Q^{-1}(t)$. Здесь корреляционная матрица $R(t)$ определяется из уравнения Риккати [10—12]:

$$\dot{R}(t) = AR(t) + R(t)A^{\mathrm{T}} - R(t)C^{\mathrm{T}}Q^{-1}(t)CR(t),$$
$$R(t_0) = \theta_{X_0}, \quad (7)$$

где $\theta_{X_0}$ — начальное значение апостериорной дисперсии ошибки оценки.

**Пример.** Пусть в объеме плоского стального образца в начальный момент времени содержится $N_0 = 5000$ ячеек, потенциально разрушаемых при фрикционном взаимодействии со стальным контртелом. Вероятность разрушения одной ячейки за секунду $W = 5 \cdot 10^{-4}$. В качестве измерителя АЭ используем интегратор, полезный сигнал $X(t)$ которого (на выходе) из-за разрушения $N_T$ ячеек (рис. 2, *а*) подвержен влиянию аддитивной помехи $\eta(t)$ — белого гауссова шума со среднеквадратичным отклонением $x = 0{,}1$ мкВ и средним нулевым. В результате регистрируется векторный сигнал $Z(t)$, изображенный на рис. 2, *б*. Необходимо получить вектор оценки полезного сигнала АЭ $\tilde{X}(t)$ с применением фильтра Калмана—Бьюси.

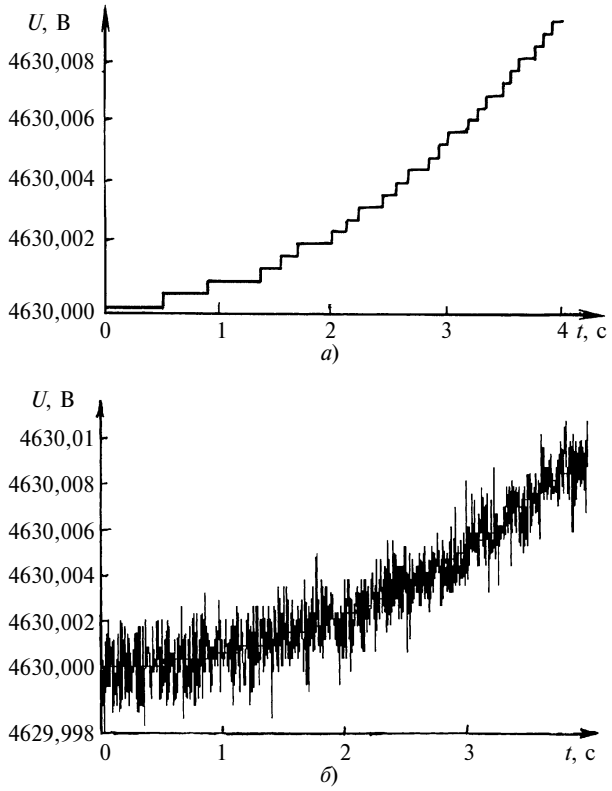



**Рис. 2. Временные диаграммы первичного (*а*) и искаженного (*б*) сигналов АЭ при измерении интегратором**

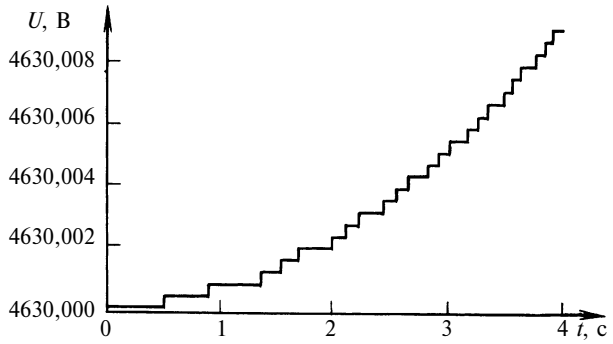



**Рис. 3. Временная диаграмма оценки полезного сигнала на выходе интегратора**

Задача выполнена в программной среде Maple. На основании уравнений (5) получена математическая модель сигналов АЭ с учетом воздействия шума, кроме того, для этих сигналов с использованием выражений (6) и (7) синтезирован фильтр Калмана—Бьюси. Временная диаграмма искомой оценки полезного сигнала на выходе интегратора приведена на рис. 3.

Кривые первичного сигнала АЭ и его оценки практически совпадают. Отметим, что моделирование процесса фильтрации при бóльших напряжениях шума и различных значениях $W$ и $N_0$ также обнаруживает совпадение первоначальной и оценочной кривых сигнала АЭ. Следовательно, выбранный алгоритм позволяет минимизировать ошибку оценки полезного сигнала АЭ при известных статистических характеристиках шума и является эффективным в достаточно большом диапазоне значений параметров модели сигнала.

Таким образом, точность измерений параметров АЭ в условиях возмущающих факторов может быть повышена программно, без использования дополнительных аппаратных средств защиты от влияния помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акустические** и электрические методы в триботехнике / А. И. Свириденок, Н. К. Мышкин, Т. Ф. Калмыкова и др. Под ред. В. А. Белого. Наука и техника, 1987. 280 с.

2. **Акустико-эмиссионная** диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. Под ред. Л. Н. Степановой. М.: Радио и связь, 2000. 280 с.

3. **Щавелин В. М., Сарычев Г. А.** Исследование акустического излучения, возникающего в зоне фрикционного контакта твердых тел // Трение и износ. 1983. № 5. С. 808—816.

4. **Анализ** акустического излучения при фрикционном взаимодействии твердых тел / Г. А. Сарычев, В. М. Щавелин, В. М. Баранов и др. // Трение и износ. 1985. № 1. С. 39—47.

5. **Вайнберг В. Е., Кантор А. Ш., Лупашку Р. Г.** Применение кинетической концепции разрушения для расчета интенсивности акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1976. № 3. С. 89—96.

6. **Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

7. **Гарбар И. И.** Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении // Трение и износ. 1981. № 6. С. 1076—1084.

8. **Цеснек Л. С.** Механика и физика истирания поверхностей. М.: Наука, 1979. 264 с.

9. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.

10. **Красовский А. А.** Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 712 с.

11. **Казаков И. Е.** Статистическая теория систем управления в пространстве. М.: Наука, 1975. 432 с.

12. **Тихонов В. И.** Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 319 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 621.891.22

В. П. БИРЮКОВ, канд. техн. наук (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН)

# Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения

Раскрыты особенности формирования многостадийных термических циклов при упрочнении поверхностей трения и наплавке покрытий с использованием способа и устройства для высокочастотного сканирования лазерного луча. Получена расчетно-экспериментальная зависимость глубины упрочненного слоя от режимов обработки. Разработана технология лазерного упрочнения рабочей поверхности винтов скольжения при синусоидальных колебаниях лазерного луча, позволяющая повысить их износостойкость в 3 раза.

Приоритетными направлениями повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин являются лазерное упрочнение, легирование и наплавка порошковыми покрытиями. Для лазерного упрочнения могут быть использованы двух- и трехстадийные термические циклы. Сравнительный анализ этих циклов при проведении поверхностной закалки инструментальных сталей Р18 и ШХ15 приведен в работе [1]. Двухстадийный термический цикл реализуется при закалке лазерами как импульсного, так и непрерывного действия. В первом случае время нагрева определяется длительностью лазерного импульса $\tau_0$, во втором — временем прохождения лазерного луча над заданной точкой поверхности $d/v$, где $d$ — диаметр луча, $v$ — скорость его движения. Время охлаждения определяется скоростью отвода теп-

лоты в глубь детали. Трехстадийный термический цикл может быть реализован с помощью лазеров непрерывного или импульсно-периодического действия. В первом случае необходимо сканирование луча при его поступательном движении над обрабатываемой поверхностью. За время лазерного воздействия температура возрастает, за время "темного промежутка" — падает, так что в целом температура $T$ колеблется около некоторого среднего значения $T > T_а$, где $T_а$ — температура аустенизации. Перспективен трехстадийный термический цикл, имеющий стадию выдержки при температуре выше $T_а$. При этом происходит более полное фазовое и структурное превращение и глубина закаленного слоя увеличивается.

В сталях с содержанием углерода до 0,5 % термический цикл, создаваемый расфокусированным круглым лазерным пятном на оптимальных режимах, обеспечивает условия закалки без дефектов в виде трещин. В высоколегированных сталях сложного состава с большим содержанием углерода длительность лазерного нагрева является недостаточной для протекания диффузионных процессов, лимитирующих фазовые превращения [2]. Происходит смещение температуры начала аустенизации [2, 3]. Лазерная термообработка высоколегированных сталей в некоторых случаях приводит к образованию закалочных структур низкоуглеродистового мартенсита [4] или к появлению наряду с мартенситом большой доли аустенитной фазы, что не обеспечивает требуемых механических свойств и износостойкости поверхностей трения.

В работе [5] в качестве лазерного теплового воздействия исследовали трехстадийный цикл, включающий стадию быстрого нагрева до температуры $T_а < T < T_{пл}$, стадию выдержки при постоянной температуре на поверхности образца и стадию охлаждения, позволяющую получить мартенсит. Выдержка при высокой температуре способствует более существенному перераспределению углерода.

В ИМАШе разработаны способ и устройство для воздействия на поверхность лазерным пятном с регулируемой плотностью мощности [6]. Это достигается высокочастотным сканированием луча в направлении, перпендикулярном движению образца (детали), с частотой до 600 Гц и смещением оптических элементов вдоль оси сканирующего устройства с вращающимися зеркалами. Лазерный луч от каждого оптического элемента перемещается от одного края дорожки упрочнения к другому. В этом состоит отличие от синусоидального перемещения луча, когда работает сканирующее устройство с колеблющимся зеркалом, имеющим остановку в крайних точках перемещения луча. Способ позволяет создавать многостадийные термические циклы: быстрый нагрев до температуры $T_{max}$, выдержка, охлаждение (рис. 1, *а*); быстрый нагрев до $T_{пл}$ = 500 ÷ 600 °С, охлаждение до 300 ÷ 400 °С, быстрый нагрев до температуры $T_{max}$ (выше начала фазовых превращений или плавления), выдержка, охлаждение (рис. 1, *б*); быстрый нагрев до $T_{пл}$ покрытия, выдержка, охлаждение до 150 ÷ 200 °С, нагрев до 500 ÷ 600 °С, охлаждение (рис. 1, *в*); быстрый нагрев до 500 ÷ 600 °С, охлаждение до 300 ÷ 400 °С, быстрый нагрев

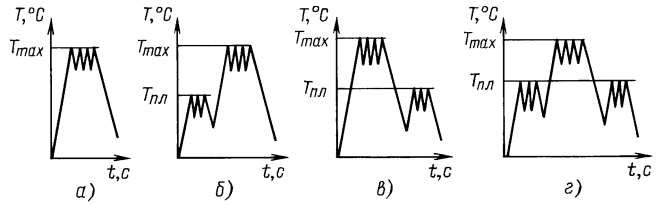



**Рис. 1. Термические циклы при воздействии на поверхность лазерным пятном с регулируемой плотностью энергии**

до $T_{пл}$ покрытия, выдержка, охлаждение до 150 ÷ 200 °С, нагрев до 500 ÷ 600 °С, охлаждение (рис. 1, *г*).

На поверхности детали при варианте *а* формируется лазерное пятно, близкое по форме к прямоугольнику (далее по тексту — прямоугольная форма). Его размеры зависят от мощности излучения, диаметра лазерного луча на поверхности детали, скорости обработки. В данной работе получен трехстадийный термический цикл с временем выдержки 0,3 ÷ 1,5 с.

В работе [7] исследовали характер распределения остаточных напряжений, формирующихся на поверхности высокохромистого чугуна ИЧХ 16 НМФТЛ при воздействии непрерывного лазерного излучения, в зависимости от исходного состояния чугуна и параметров лазерной обработки. Использовали: исходные (литые) чугуны и чугуны, прошедшие термообработку (закалка от 980 °С в масле). Зона упрочнения в литом чугуне состоит из мартенсита и крупных эвтектических карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$; в термообработанном — из мартенсита и эвтектически вновь выделившихся дисперсионных карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$. Формирование в литом чугуне в зоне лазерного воздействия растягивающих остаточных напряжений обусловлено в основном взаимодействием сжимающихся при охлаждении микрообъемов аустенита с окружающей исходной структурой.

В термообработанном чугуне в центральной части оплавленной дорожки уровень остаточных напряжений колеблется в интервале −50 ÷ +30 МПа, а на краях он повышается до 620 МПа. Лазерное воздействие приводит к образованию большого числа трещин. Предварительный нагрев образцов до 400 °С позволяет исключить трещинообразование. Однако в производственных условиях выполнение предварительного нагрева с последующей лазерной обработкой не нашло широкого распространения. Поэтому для деталей из чугуна, склонного к трещинообразованию, при лазерной обработке предлагается термический цикл *б* (см. рис. 1), описанный выше. При этом на поверхности детали формируются два прямоугольных пятна. В первом пятне сосредоточено 10 ÷ 20 % общей энергии, подводимой к поверхностному слою. В этом пятне осуществляется предварительный нагрев поверхности до температуры 500 ÷ ÷ 600 °С. В промежутке между действием первого и второго пятен происходит охлаждение до 300 ÷ 400 °С. За первым на заданном расстоянии располагается второе прямоугольное лазерное пятно, в котором осуществляются основной нагрев до температуры выше $T_а$ и выдержка при этой температуре. При работе расфокусированным круглым лучом время воздействия на поверхность в центре луча пропорционально его диаметру, а по краям стремится к нулю. Ска-

нирование луча перпендикулярно к направлению перемещения детали позволяет выравнять плотность мощности и время воздействия луча по ширине упрочняемой зоны.

Газотермическое напыление порошками на никелевой и (или) железной основе с последующим оплавлением лучом лазера является востребованным технологическим процессом. Одной из проблем, возникающих при оплавлении сплава высокоскоростными нагревателями, является трещинообразование [8]. Появление трещин в процессе лазерной обработки при относительно высоких плотностях мощности и скоростях перемещения луча приводит к формированию структур с высокой степенью неравновесности, пересыщению никелевой матрицы и измельчению структурных составляющих. Однако при этих режимах наблюдается максимальное увеличение износостойкости.

В работе [8] рассмотрены проблемы трещинообразования при оплавлении газотермических покрытий на основе никелевого самофлюсующегося сплава ПН-ХН80С3Р3. Основной причиной трещинообразования являются термические напряжения, обусловленные высокими скоростями охлаждения зоны обработки жидкой фазы и возникающим при этом значительным градиентом температур по глубине слоя. Для уменьшения трещинообразования могут быть введены добавки, увеличивающие количество легкоплавкой составляющей. Однако это может привести к снижению износостойкости покрытия. Авторы работы [8] используют варьирование энергии по сечению лазерного пятна. На первом этапе воздействует часть луча с более высокой плотностью мощности, а затем — часть с пониженной плотностью мощности. Изменение распределения плотности мощности по лазерному пятну обеспечивалось разъюстировкой концевых зеркал резонатора лазера ЛГН-702. Ступенчатый подвод энергии в зону обработки оказывается наиболее выгодным с точки зрения уменьшения трещинообразования. Следует отметить, что авторам этой работы удалось уменьшить удельную длину трещин с 250 до 20 мкм/мм$^2$ при оптимальном соотношении плотностей мощности второй и первой зон лазерного пятна. Однако такой метод обработки подходит для лабораторных условий и не может быть применим при промышленной обработке деталей машин.

Для лазерного оплавления газотермических покрытий целесообразно использовать термические циклы *в* и *г* (см. рис. 1). При режиме *в* на поверхности детали формируются два прямоугольных пятна. В первом пятне используется 70 ÷ 80 % энергии, подводимой к поверхности, осуществляются нагрев до $T_{пл}$ покрытия, выдержка. После охлаждения до 150 ÷ 200 °С идет дополнительный нагрев поверхностного слоя до 500 ÷ 600 °С вторым лазерным пятном. При режиме *г* на поверхности детали формируются три прямоугольных пятна. В первом пятне сосредоточено 10 ÷ 25 %, во втором — 50 ÷ 80 %, в третьем 10 ÷ 25 % подводимой энергии. При воздействии таким комбинированным источником энергии общее время термического цикла увеличивается, температурные напряжения, возникающие в поверхностном слое детали, уменьшаются из-за снижения градиента температур и резко уменьшается вероятность образования трещин в оплавляемых покрытиях.

Исходя из расчета температурных полей при нагреве металлов движущимся источником теплоты круглой формы с однородным распределением интенсивности, получено линеаризованное выражение для определения температуры [9]:

$$T(Z,\ t) = \frac{P_{эф}}{\pi r^2 \lambda}\left[\left(\frac{4\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} - Z\right],$$

где $P_{эф} = AP$ — эффективная поглощенная мощность излучения ($P$ — мощность лазерного излучения; $A$ — коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью материала); $\lambda$ — коэффициент теплопроводности; $\alpha$ — коэффициент температуропроводности; $t$ — время закалки.

Если считать, что закалка происходит по всей области, где температура материала выше температуры закалки $T_{зак}$ (температуры фазового перехода), то максимально достижимая глубина закалки на оси круглого пучка без оплавления поверхности составит

$$Z_{зак} = \left(\frac{4at}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\lambda T_{зак} \pi r^2}{P_{эф}}. \qquad (1)$$

Для определения максимально достижимой глубины закалки на оси источника, формируемого сканирующими устройствами с колеблющимися или вращающимися зеркалами, в выражение (1) необходимо подставить площадь $S_i$ лазерного пятна и ввести коэффициенты, учитывающие частоту сканирования лазерного луча ($K_1$) и тип сканирующего устройства ($K_2$), которые определяются экспериментально. Глубина зоны закалки при воздействии пятном с регулируемой плотностью энергии при высокочастотном сканировании луча составит

$$Z_{зак} = K_1 K_2\left[\left(\frac{4at}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{T_{зак}\lambda S_i}{P_{эф}}\right].$$

Другим способом формирования пятна с выравниванием плотности мощности и времени воздействия по ширине упрочняемой зоны является сканирование луча по синусоидальному закону колеблющимся зеркалом. При обработке винтов скольжения фрезерных станков лазерный луч передается с помощью внешней оптической системы на сканирующее устройство и фокусируется оптической головкой на обрабатываемой поверхности (рис. 2).

В качестве материала для изготовления винтов скольжения использовали сталь У8А. Опытную партию винтов обрабатывали на лазерной установке "Комета-М" при мощности излучения 1,5 кВт и линейной скорости перемещения 15 мм/с. Для увеличения коэффициента поглощения инфракрасного лазерного излучения обрабатываемой винтовой поверхностью использовалось покрытие СГ-504. Покрытие толщиной 0,1 ÷ 0,15 мм наносили поролоновым валиком. После сушки в течение 2 ч детали устанавливали в лазерный модуль, предназначенный для обработки тел вращения. Глубину лазер-

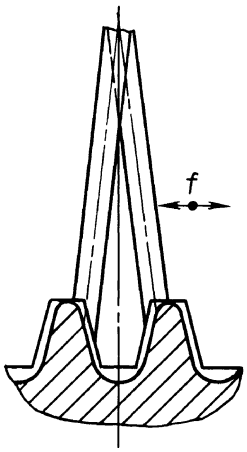



**Рис. 2. Схема лазерного упрочнения сканирующим лучом по синусоидальному закону с частотой $f = 200 \div 300$ Гц**

ной закалки и микроструктуру контролировали стандартным металлографическим методом, для травления использовали 3 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н. Глубина упрочненного слоя по боковой поверхности выступа резьбы составляла 0,5 ÷ 0,7 мм, микротведость закаленного слоя — 8410 ÷ 11000 МПа, твердость основы — 170 ÷ 187 НВ. Обработку производили без оплавления поверхности. При лазерном упрочнении винтов скольжения размеры и форма профиля резьбы не изменяются. На рис. 3 представлен микрошлиф фрагмента винта, упрочненного сканирующим лазерным лучом, диаметром 40 мм с шагом резьбы 6 мм. Производительность обработки при синусоидальном колебании луча в 2 раза выше, чем при работе расфокусированным круглым пятном. Объясняется это тем, что для обработки профиля резьбы неподвижным лучом необходимо сделать два прохода.

Сравнительные испытания на изнашивание проводили на образцах из стали У8А с размерами 15×20×70 мм. Упрочнение проводили нанесением четырех дорожек закалки шириной 6 мм с перекрытием 20 % по широкой стороне образца. Для сравнительных испытаний использовали машину трения возвратно-поступательного движения. Пара трения находилась в масляной ванне. В качестве смазочного материала использовали масло Индустриальное-40. Удельная нагрузка составляла 3 МПа, скорость скольжения — 33 мм/с. В качестве контртела использовали неупрочненные образцы из стали У8А твердостью 170 ÷ 185 НВ. В результате проведенных исследований установлено повышение износостойкости образцов, упрочненных при синусоидальном режиме сканирования луча, в 3 ÷ 3,5 раза по сравнению с неупрочненными образцами. Следует отметить, что серийно изготовляемые винты из сталей У8А, У10А, А40Г подвергаются нормализации с высоким отпуском и стабилизирующей обработке.

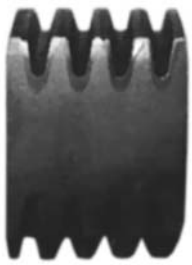


**Рис. 3. Микрошлиф ходового винта из стали У8А, упрочненного сканирующим лазерным лучом**

Выводы

1. Упрочнение деталей и наплавку покрытий, склонных к трещинообразованию, следует проводить с применением способа и устройства для формирования лазерного пятна с регулируемой плотностью мощности по его сечению в направлении движения.

2. Для уточнения режимов обработки при многостадийных циклах необходимы дополнительные исследования, но уже сейчас можно сказать, что применение разработанных способа и устройства воздействия лазерным пятном с регулируемой плотностью мощности излучения на поверхность обрабатываемой детали существенно расширяет технологические возможности лазерного упрочнения и наплавки деталей.

3. Получена расчетно-экспериментальная зависимость глубины упрочненного слоя при высокочастотном сканировании лазерного луча от режимов обработки.

4. Разработана технология лазерного упрочнения рабочей поверхности винтов скольжения при синусоидальных колебаниях лазерного луча, позволяющая повысить их износостойкость в 3 раза по сравнению с серийными винтами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бертяев Б. И., Завестовская И. Н., Игошин В. И.** Сравнительный анализ двух- и трехстадийных термических циклов при поверхностной лазерной закалке сталей // Физика и химия обработки материалов. 1986, № 5. С. 88—95.

2. **Криштал М. А., Жуков А. А., Кокора А. Н.** Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М.: Металлургия, 1973. 192 с.

3. **О смещении** температуры инструментального начала аустенитного превращения в сталях при скоростном и лазерном нагреве / Г. Ю. Баландина, Б. И. Бертяев, И. Н. Завестовская и др. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 11. С. 2315—2319.

4. **Каюков С. В.** О механизме лазерного упрочнения быстрорежущих сталей // Создание и использование лазерной техники и технологии в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. (Киев, май 1985). Киев: [Б. и.], 1985. С. 55, 56.

5. **Завестовская И. Н., Игошин В. И., Шишковский И. В.** Моделирование лазерной закалки с учетом тепловых, кинематических и диффузионных процессов // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 5. С. 50—56.

6. **Бирюков В. П.** Влияние распределения плотности мощности при лазерном упрочнении и наплавке поверхностей трения // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин: Материалы 9-й Междунар. практ. конф. Санкт-Петербург, 10—13 апр. 2007 г. СПб.: Политехн. ун-т. В 2 ч. Ч. 2. 2007. С. 48—53.

7. **Гуреев Д. М., Шухостанов В. К., Ямщиков С. В.** Формирование остаточных напряжений в высокохромистом чугуне при лазерной обработке // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 6. С. 53—57.

8. **Снижение** трещинообразования при оплавлении покрытий из самофлюсующихся сплавов лазерным лучом / В. Н. Чачин, М. А. Кардаполова, Н. В. Спиридонов и др. // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 1. С. 125—131.

9. **Андрияхин В. М., Майоров В. С., Якунин В. П.** Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических лазеров непрерывного действия // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 6. С. 140—147.

УДК 620.171.3-034.14

Л. Г. ДЕЛЮСТО, канд. техн. наук (г. Череповец)

# Оценка влияния слабого постоянного магнитного поля на механические свойства проката

В 2006 г. в рамках договора между ОАО "Северсталь" и ООО "НЛК Сталь и прокат" автором была проведена на лабораторном оборудовании исследовательская работа с целью определения возможности использования слабого постоянного магнитного поля (ПМП) для повышения эксплуатационных характеристик сталей 08Ю и 08ЮПР.

Влияние слабого ПМП на механические свойства сталей 08Ю и 08ЮПР исследовалось в магнитном поле соленоида с индукцией $B = 0{,}14$ Тл и напряженностью $H = 96$ кА/м. Для проведения исследований были подготовлены две партии образцов: 200 образцов из стали 08Ю и 200 — из стали 08ЮПР, обладающей пониженной пластичностью. Механические испытания осуществлялись в лаборатории механических испытаний ЦТРК ОАО "Северсталь".

В процессе исследования были выполнены:

1) механические испытания образцов:

а) 100 образцов — из стали 08Ю, не обработанных в ПМП, и 100 обработанных; б) 100 образцов — из стали 08ЮПР, не обработанных в ПМП, и 100 обработанных;

2) статистическая обработка результатов механических испытаний по Фишеру и Стьюденту;

3) металлографические исследования в лаборатории рентгеноструктурного анализа.

Обработку сталей 08Ю (партия 3387, плавка 160431) и 08ЮПР (партия 3696, плавка 355196) в ПМП проводили в режимах: длительность импульса ПМП — 3 с; время между импульсами — 60 с; число импульсов для стали 08Ю — 3, для стали 08ЮПР — 9; выдержка образцов перед механическими испытаниями — 24 ч.

Результаты (средние значения для каждой группы из 100 образцов) механических испытаний на разрывной машине фирмы ZWICK образцов толщиной $h = 0{,}8$ мм приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что абсолютное значение относительного удлинения образцов, обработанных в ПМП, для обеих сталей возросло на 3 %. По данному показателю из 100 образцов из стали 08ЮПР, не обработанных в ПМП, не удовлетворяли допускаемому значению 74 образца (74 %), а из 100 образцов из той же стали, обработанных в ПМП, — только 26 образцов (26 %). Из 100 образцов из стали 08Ю, не обработанных в ПМП, не удовлетворяли допускаемому значению 26 образцов (26 %), а из 100 образцов, обработанных в ПМП, — только 2 образца (2 %).

Частотное распределение относительного удлинения δ для стали 08Ю толщиной 0,8 мм показано на рис. 1, *а*, для стали 08ЮПР той же толщиной — на рис. 1, *б*. Из графиков следует, что кривые *2* частотного распределения *K* показателя δ для образцов из сталей 08Ю и 08ЮПР, обработанных в ПМП, смещены относительно кривых *1* для образцов, не обработанных в ПМП, в сто-

*Таблица 1*

| Группа образцов | Материал образца: сталь + + обработка | Относительное удлинение $\delta_{ср}$, % | Показатель нормальной пластической анизотропии $r_{ср}$ | Предел прочности $\sigma_{в.ср}$, Н/мм$^2$ | Предел текучести $\sigma_{т.ср}$, Н/мм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 08Ю без ПМП | 41 | 2,51 | 281 | 148 |
| 2 | 08Ю + + ПМП | 44 | 2,48 | 278 | 145 |
| 3 | 08ЮПР без ПМП | 28 | 1,46 | 434 | 311 |
| 4 | 08ЮПР + + ПМП | 31 | 1,54 | 437 | 310 |

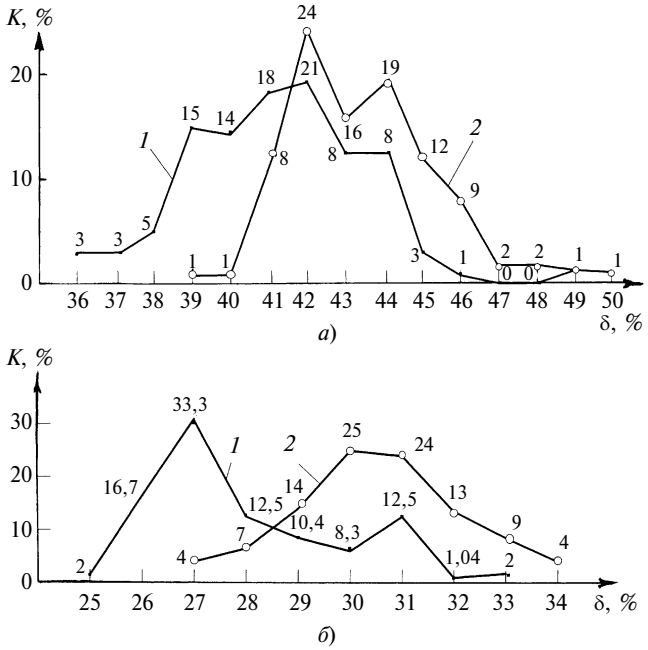



**Рис. 1. Частотное распределение относительно удлинения δ сталей 08Ю (*а*) и 08ЮПР (*б*):**
*1* — без обработки в ПМП [$\delta_{ср} = 41$ (*а*) и 28 % (*б*)]; *2* — с обработкой в ПМП [$\delta_{ср.\ м} = 44$ (*а*) и 31 % (*б*)]

*Таблица 2*

| Сталь 08Ю, $h$ = 0,8 мм | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Образец | Параметр | | | По Фишеру | | По Стьюденту | | $\pm\Delta X$*1 | |
| Без ПМП | $\sigma$ | $\sigma^2$ | $n$*2 | $F_{экс}$ | $F_{рас}$ | $t_{экс}$ | $t_{рас}$ | $t_{рас}\sigma$ | $\delta_{ср}$, % |
| | 2,27 | 5,15 | 99 | 1,4 | 1,39 | 10 | 1,99 | 4,5 | 41 |
| С ПМП | $\sigma$ | $\sigma^2_м$ | $n^{*3}_м$ | $F_{экс}$ | $F_{рас}$ | $t_{экс}$ | $t_{рас}$ | $t_{рас}\sigma_м$ | $\delta_{ср.м}$, % |
| | 1,92 | 3,69 | 95 | 1,4 | 1,39 | 10 | 1,99 | 3,8 | 44 |
| Сталь 08ЮПР | | | | | | | | | |
| Образец | Параметр | | | По Фишеру | | По Стьюденту | | $\pm\Delta X$*1 | |
| Без ПМП | $\sigma$ | $\sigma^2$ | $n$*2 | $F_{экс}$ | $F_{рас}$ | $t_{экс}$ | $t_{рас}$ | $t_{рас}\sigma$ | $\delta_{ср}$, % |
| | 1,93 | 3,74 | 95 | 1,26 | 1,39 | 11,5 | 2,64 | 5,1 | 28 |
| С ПМП | $\sigma$ | $\sigma^2_м$ | $n^{*3}_м$ | $F_{экс}$ | $F_{рас}$ | $t_{экс}$ | $t_{рас}$ | $t_{рас}\sigma_м$ | $\delta_{ср.м}$, % |
| | 1,73 | 2,97 | 99 | 1,26 | 1,39 | 11,5 | 2,64 | 4,6 | 31 |

*1 Доверительный интервал.
*2 Число степеней свободы без ПМП.
*3 Число степеней свободы с ПМП.

рону его больших значений, которые имеют меньший разброс. Значения $\delta$, превышающие допустимый предел, имели: а) 26 образцов из 100 из стали 08Ю без обработки в ПМП и один образец из 96 с обработкой в ПМП: б) 72 образца из 96 из стали 08ЮПР без обработки в ПМП и 25 образцов из 100 с обработкой в ПМП.

Статистические данные измерений, полученные при обработке образцов отожженной стали после дрессировки марок 08Ю и 08ЮПР толщиной $h$ = 0,8 мм в ПМП (напряженностью 96 кА/м) после механических испытаний на разрывной машине фирмы ZWICK, приведены в табл. 2.

### Проверка гипотез по Фишеру и Стьюденту[1]

Проверки гипотезы о равенстве двух дисперсий (средний квадрат отклонения отдельных результатов от среднего значения случайной величины) и гипотезы о равенстве двух средних значений относительного удлинения были проведены по результатам обработки в ПМП и механических испытаний на разрывной машине (РМ) фирмы ZWICK образцов из стали марок 08Ю и 08ЮПР толщиной 0,8 мм.

Проверка по Фишеру гипотезы о равенстве двух дисперсий образцов из стали 08Ю:

1. $F_{экс} = \sigma^2/\sigma^2_м = 5{,}15/3{,}69 = 1{,}4$.
2. Заданная вероятность ошибки 0,05.
3. Число степеней свободы по двум выборкам в эксперименте: для $\sigma^2$ $n = n_1 = 99$, где $n_1 = 100$ — число образцов без ПМП; для $\sigma_м$ $n_м = n_2 - 1 = 95$, где $n_2 = 96$ — число образцов с ПМП.
4. По таблице № 4 Фишера расчетное значение $F_{0,05;\ 99;\ 95} = 1{,}39$.

Так как полученное $F_{экс} = 1{,}4$ больше, чем $F_{0,05;\ 99;\ 95} = 1{,}39$, то гипотеза о равенстве двух дисперсий отвергается. При обработке в ПМП 99 % точек не выходят за допустимый предел, а без ПМП — 74 %.

Проверка гипотезы о равенстве двух дисперсий для образцов из стали 08ЮПР:

1. $F_{экс} = \sigma^2/\sigma^2_м = 3{,}74/2{,}97 = 1{,}26$.
2. Заданная вероятность ошибки 0,05.
3. Число степеней свободы по двум выборкам в эксперименте: для $\sigma^2$ $n = n_1 - 1 = 95$, где $n_1 = 96$ — число образцов без ПМП; для $\sigma_м$ $n_м = n_2 - 1 = 99$, где $n_2 = 100$ — число образцов с ПМП.
4. По таблице № 4 Фишера расчетное значение $F_{0,05;\ 99;\ 95} = 1{,}39$.

Так как полученное $F_{экс} = 1{,}26$ меньше, чем $F_{0,05;\ 99;\ 95} = 1{,}39$, то и гипотеза о равенстве двух дисперсий не отвергается. При обработке в ПМП 74 % точек не выходят за допустимый предел, а без ПМП — 23 %.

Проверка по Стьюденту гипотезы о равенстве двух средних значений относительного удлинения образцов из стали 08Ю:

$$1.\ S^2 = [\sigma^2(n-1) + \sigma^2_м(n_м - 1)]/(n + n_м) = (5{,}15 \cdot 99 + 3{,}70 \cdot 95)/(95 + 99) = 4{,}45,$$

где $S^2$ — средняя по двум выборкам оценка стандартной ошибки; $\sigma^2$, $\sigma^2_м$ — средние квадраты отклонений отдельных результатов от среднего значения случайной величины для образцов соответственно без ПМП и с ПМП.

$$2.\ t_{экс} = \frac{\delta_{ср.м} - \delta_{ср}}{\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n_м}}S} = \frac{44 - 41}{\sqrt{\frac{1}{95} + \frac{1}{99}}4{,}45} = 10,$$

где $t_{экс}$ — экспериментальное значение критерия Стьюдента.

[1] **Математическая** статистика. 2-е изд., перераб. доп. / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова, И. О. Решетникова. М.: 1975. 372 с.

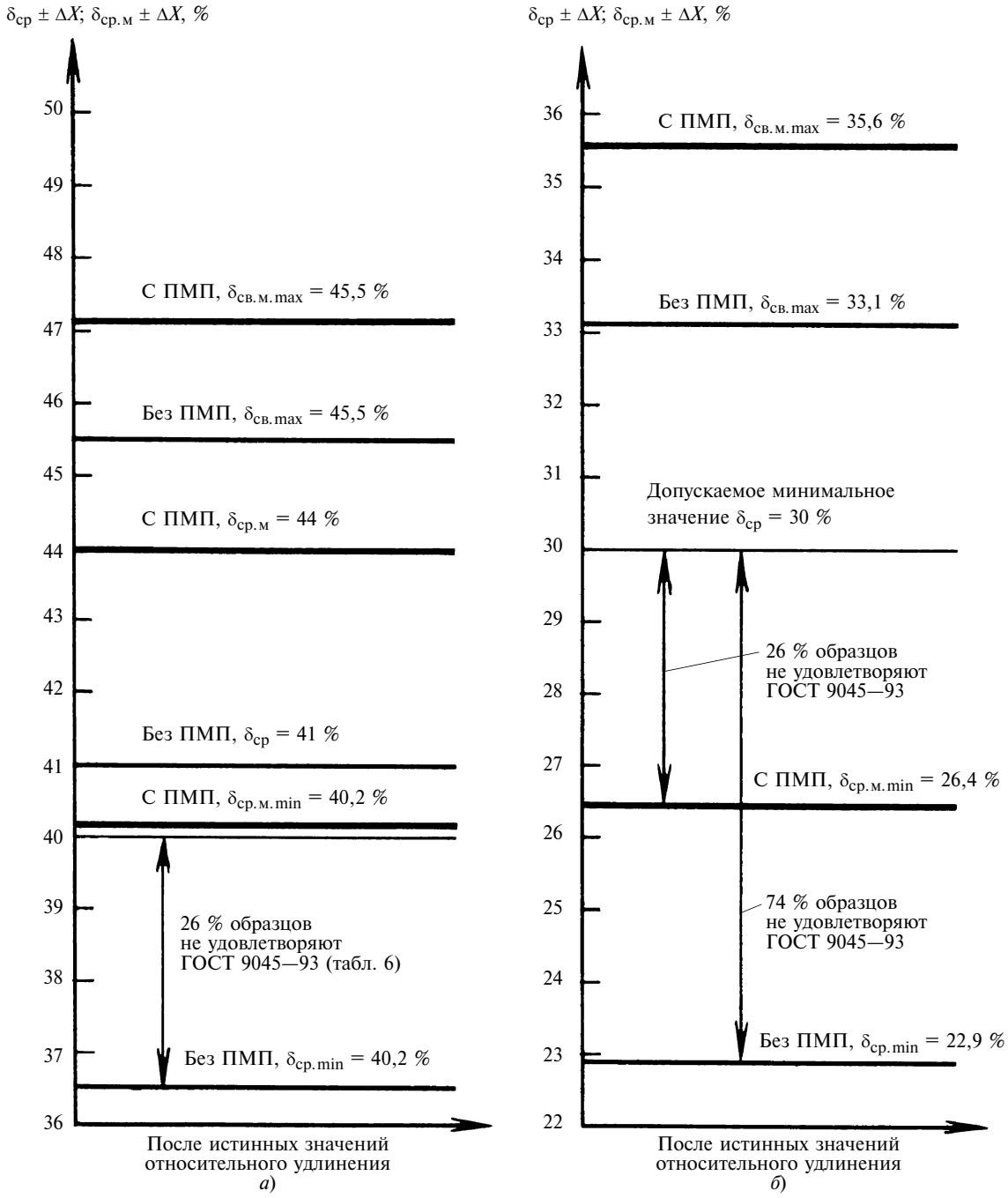



**Рис. 2. Графики доверительного интервала среднего относительного удлинения образцов из стали 08Ю (*а*) и 08ЮПР (*б*):** $h$ = 0,8 мм, $H_{ост}$ = 96 кА/м

3. Число степеней свободы по двум выборкам:

$$n_1 + n_2 - 2 = 100 + 96 - 2 = 194.$$

4. По таблице № 6 Стьюдента находим значение $t$ — распределения: $t_{99;\ 95;\ 194} = 1{,}99$. Так как полученное $t_{экс} = 10 \gg t_{99;\ 95;\ 194} = 1{,}99$, то гипотеза о равенстве двух средних значений относительного удлинения отвергается.

Проверка гипотезы о равенстве двух средних значений относительного удлинения для образцов из стали 08ЮПР:

1. $S^2 = (3{,}74 \cdot 95 + 2{,}97 \cdot 99)/(95 + 99) = 3{,}35$.

2. $t_{экс} = (31 - 28)/\sqrt{(1/95 + 1/99)} \cdot 3{,}35 = 11{,}5$.

3. Число степеней свободы: $n_1 + n_2 - 2 = 96 + 100 - 2 = 194$.

4. По таблице № 6 Стьюдента находим значение $t$-распределения: $t_{99;\ 95;\ 194} = 2{,}64$. Так как полученное $t_{экс} = 11{,}5 \gg t_{99;\ 95;\ 194} = 2{,}64$, то гипотеза о равенстве двух средних значений относительного удлинения отвергается.

Таким образом, полученные средние значения относительного удлинения образцов указанных марок ста-

*Таблица 3*

| Сталь 08Ю, $h$ = 0,8 мм | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Без обработки в ПМП | | | | После обработки в ПМП ($H$ = 100 кА/м) | | | |
| Образец | № п/п | $\beta_{211}$, град | $\beta_{200}$, град | Образец | № п/п | $\beta_{211}$, град | $\beta_{200}$, град |
| № 1 | 1 | 0,16 | 0,13 | № 1М | 1 | 0,16 | 0,12 |
| | 2 | 0,16 | 0,12 | | 2 | 0,17 | 0,13 |
| | 3 | 0,16 | 0,25 | | 3 | 0,16 | 0,12 |
| | 4 | 0,16 | 0,16 | | 4 | 0,16 | 0,16 |
| | 5 | 0,16 | 0,27 | | 5 | 0,17 | 0,15 |
| | 6 | 0,16 | 0,18 | | 6 | 0,17 | 0,17 |

*Таблица 4*

| Сталь 08ЮПР, $h$ = 0,8 мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Без обработки в ПМП | | | После обработки в ПМП ($H$ = 100 кА/м) | | |
| Образец | № п/п | $\beta_{211}$, град | Образец | № п/п | $\beta_{211}$, град |
| № 017 | 1 | 0,27 | № 013М | 1 | 0,23 |
| | 2 | 0,28 | | 2 | 0,19 |
| | 3 | 0,28 | | 3 | 0,20 |
| | 4 | 0,26 | | 4 | 0,21 |
| | 5 | 0,26 | | 5 | 0,23 |
| | 6 | 0,25 | | 6 | 0,20 |

*Таблица 5*

| Сталь 08Ю, $h$ = 0,8 мм | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Без обработки в ПМП | | | | После обработки в ПМП ($H$ = 100 кА/м) | | | |
| Образец | № п/п | $\sigma_{211}$, $10^{-4}$ МПа | $\sigma_{200}$, $10^{-4}$ МПа | Образец | № п/п | $\sigma_{211}$, $10^{-4}$ МПа | $\sigma_{200}$, $10^{-4}$ МПа |
| № 1 | 1 | 4,94 | 5,96 | № 1М | 1 | 4,94 | 5,50 |
| | 2 | 4,94 | 5,50 | | 2 | 5,25 | 5,96 |
| | 3 | 4,94 | 11,46 | | 3 | 4,94 | 5,50 |
| | 4 | 4,94 | 7,33 | | 4 | 4,94 | 7,33 |
| | 5 | 4,94 | 12,80 | | 5 | 5,25 | 6,88 |
| | 6 | 4,94 | 8,25 | | 6 | 5,25 | 7,79 |

*Таблица 6*

| Сталь 08ЮПР, $h$ = 0,8 мм | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Без обработки в ПМП | | | После обработки в ПМП ($H$ = 100 кА/м) | | |
| Образец | № п/п | $\sigma_{211}$, $10^{-4}$ МПа | Образец | № п/п | $\sigma_{211}$, $10^{-4}$ МПа |
| № 017 | 1 | 8,34 | № 013М | 1 | 7,10 |
| | 2 | 8,65 | | 2 | 5,87 |
| | 3 | 8,65 | | 3 | 6,18 |
| | 4 | 8,03 | | 4 | 6,48 |
| | 5 | 8,03 | | 5 | 7,10 |
| | 6 | 7,72 | | 6 | 6,18 |

ли, обработанных в ПМП, не являются случайными величинами и не могут считаться ошибочными.

На рис. 2 показаны графики доверительных интервалов для сталей 08Ю (*а*) и 08ЮПР (*б*), из которых следует, что у образцов, предварительно обработанных в ПМП, разброс значений относительного удлинения значительно меньше, чем у образцов, не обработанных в ПМП.

## Рентгеноструктурный анализ стали марок 08Ю и 08ЮПР

Исследование проводилось в лаборатории рентгеноструктурного анализа ЦТРКА на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. В табл. 3 и 4 приведены экспериментальные результаты измерения физического уширения рентгеновских линий стали до и после обработки в ПМП. Данные расчета микронапряжений в кристаллических решетках приведены в табл. 5 и 6. Исследования показали, что в стали 08Ю после обработки в ПМП неоднородность в плоскости образца сглаживается, одновременно снижается средний уровень микронапряжений. Обработка в ПМП стали 08ЮПР влияет на уменьшение микронапряжений в зернах одного из основных компонентов текстуры стали (211). Анализ показал, что магнитная обработка в слабом поле напряженностью ≈ 100 кА/м влияет на внутренние микронапряжения зерен разных кристаллографических ориентаций в готовой холоднокатаной стали исследованных марок 08Ю и 08ЮПР толщиной 0,8 мм, снижая их в среднем на 20÷25 %, и одновременно повышает однородность физико-механических свойств проката.

## Выводы

1. Кривые частотного распределения $K$ показателя $\delta_{ср}$ для образцов из сталей 08Ю и 08ЮПР после обработки в ПМП смещены относительно кривых для образцов без обработки в ПМП в сторону бóльших значений относительного удлинения, которые имеют меньший разброс.

2. Полученные средние значения относительного удлинения образцов указанных марок стали, обработанных в ПМП, не являются случайными величинами и не могут считаться ошибочными.

3. Магнитная обработка в слабом поле напряженностью ≈ 100 кА/м влияет на внутренние микронапряжения зерен разных кристаллографических ориентаций в готовой холоднокатаной стали марок 08Ю и 08ЮПР, снижая их в среднем на 20÷25 %, и одновременно повышает однородность физико-механических свойств проката.

4. Данное исследование показывает перспективность способа обработки холоднокатаной стали с целью получения качественного металла.

УДК 621.7-192

А. В. ШАШОК, канд. техн. наук (Рубцовский индустриальный институт)

# Прогнозирование надежности операций токарной обработки по показателям качества изготовляемой продукции

Одним из направлений повышения эффективности современного металлообрабатывающего производства является направление, связанное с оценкой надежности технологических систем (ТС), реализующих технологические процессы (ТП) обработки металлов резанием, и использованием полученных оценок для принятия научно обоснованных технических решений как при сопровождении действующего, так и при проектировании нового производства.

Ключевым показателем надежности ТС (независимо от метода обработки), входящих в состав ТП, является надежность по показателям качества обрабатываемой детали. Количественной оценкой данного показателя можно считать величину $P_{н.1}$ — вероятность того, что значения показателей качества детали при обработке не превысят их предельно допустимых значений (будут находиться в пределах поля допуска):

$$P_{н.1} = P(x_1^{min} \leqslant x_1 \leqslant x_1^{max}, ..., x_s^{min} \leqslant x_s \leqslant x_s^{max}), \quad (1)$$

где $x_j$ ($j = l, ..., s$) — значение $j$-го показателя качества; $x_j^{min}$, $x_j^{max}$ — нижнее и верхнее предельно допустимые значения $j$-го показателя качества.

В соответствии с выражением (1) критерием отказа технологической операции предлагается считать превышение каким-либо показателем качества его предельно допустимых значений.

Примем допущение, что для операций токарной обработки наружных цилиндрических поверхностей в качестве основных по показателям качества обрабатываемой детали могут быть рассмотрены отказы, представленные в табл. 1.

Значения величины $P_{н.1}$ предлагается прогнозировать на основе имитационного моделирования процессов одновременного развития основных видов отказов технологической системы токарной обработки (ТСТО) многоканальной системой массового обслуживания (СМО) с графом состояний, представленным на рис. 1. Число каналов СМО принимается равным числу основных видов отказов. Каждый канал моделирует процесс возникновения одного из рассматриваемых отказов. Требованием на обслуживание в такой СМО является заготовка, поступающая для обработки на технологическую операцию. Под обслуживанием требования понимается получение в результате обработки детали с одним или несколькими отказами по показателям качества, контролируемым на данной операции.

В соответствии с графом состояний возможны следующие состояния СМО: "0" — система "готова к обслуживанию" или содержит "обслуженное требование", т. е. обработанную заготовку с одним или несколькими отказами; "1" — состояние "обслуживания требования", что соответствует обработке заготовки на технологической операции.

Потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, полагаются ординарными, стационарными и без последействия. Параметры СМО предлагается оценивать следующими выражениями:

$$\lambda_{01} = \frac{1}{T}; \ \mu_{10.j} = \lambda_{01}\frac{1 - P_{н.1.j}}{P_{н.1.j}}, \quad (2)$$

где $T$ — средний промежуток времени между поступлениями заготовок в ТС; $P_{н.1.j}$ — вероятность отсутствия в обрабатываемой детали отказа по $j$-му показателю качества.

*Таблица 1*

| Номер отказа | Наименование отказа | Критерий отказа |
|---|---|---|
| 1 | Выход размера детали за верхнюю границу поля допуска | $D > D^{max}$ |
| 2 | Выход размера детали за нижнюю границу поля допуска | $D < D^{min}$ |
| 3 | Превышение отклонением от круглости верхней границы поля допуска | $\Delta R > \Delta R^{max}$ |
| 4 | Превышение параметром шероховатости предельно допустимого значения | $Ra > Ra^{max}$ |

Примечание. $D$ — диаметр детали; $\Delta R$ — отклонение от круглости детали; $Ra$ — среднее арифметическое отклонения профиля.

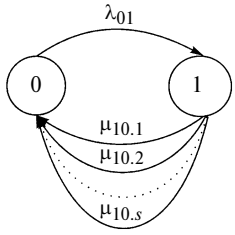



**Рис. 1. Граф состояний СМО, моделирующей процесс одновременного развития всех видов отказов по показателям качества обрабатываемой детали**

Вероятность отсутствия в обработанной детали всех видов отказов принимается равной вероятности нахождения СМО в состоянии "1".

Решение системы дифференциальных уравнений Колмогорова, описывающей функционирование данной системы в нестационарном режиме, дает следующую зависимость для искомой вероятности [1]:

$$P_{\text{н.1}} = \frac{1}{A}[1 + (A - 1)\exp(-A)], \qquad (3)$$

где $A = \sum_{j=1}^{s} \frac{1}{P_{\text{н.1}.j}} - (s - 1)$.

Чтобы определить значения $P_{\text{н.1}.j}$, необходимо сформировать комплекс информационных моделей, позволяющих оценивать значения показателей качества обработанной детали в зависимости от значений параметров, характеризующих функционирование ТСТО (физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, динамические характеристики основных узлов оборудования и т. д.). Такие модели разрабатывают либо на основе расчетных методов, учитывающих специфику рассматриваемой операции, либо на основе обработки литературных данных и данных технологической практики методами математической статистики.

В зависимости от способа получения информационной модели формирования значений $j$-го показателя качества для оценивания $P_{\text{н.1}.j}$ предлагается использовать методы либо параметрической теории надежности, либо теории массового обслуживания.

Вероятность отсутствия в обработанной детали отказа по $j$-му показателю качества, оцениваемая методами параметрической теории надежности, определяется выражениями:

$$P_{\text{н.1}.j} = P(x_j \leqslant x_j^{\max}) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{x_j^{\max} - \overline{x}_j}{\sqrt{S_{x_j}^2 + S_{x_j^{\max}}^2}}\right); \qquad (4)$$

$$P_{\text{н.1}.j} = P(x_j \geqslant x_j^{\min}) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{\overline{x}_j - x_j^{\min}}{\sqrt{S_{x_j}^2 + S_{x_j^{\min}}^2}}\right); \qquad (5)$$

$$P_{\text{н.1}.j} = \mathrm{P}(x_j^{\min} \leqslant x_j \leqslant x_j^{\max}) = \\ = \Phi\left[\frac{\overline{x}_j - x_j^{\min}}{\sqrt{S_{x_j}^2 + S_{x_j^{\min}}^2}}\right] + \Phi\left[\frac{x_j^{\max} - \overline{x}_j}{\sqrt{S_{x_j}^2 + S_{x_j^{\max}}^2}}\right]; \qquad (6)$$

$$S_{x_j}^2 = \sum_{m=1}^{L}\left(\frac{\partial F_j}{\partial z_m}\right)^2 \sigma_{z_m}^2 + \\ + \sum_{\substack{m=1,\, k=1 \\ m \neq k}}^{L}\left(\frac{\partial F_j}{\partial z_m}\right)\left(\frac{\partial F_j}{\partial z_k}\right)\rho_{mk}\sigma_{z_m}\sigma_{z_k}, \qquad (7)$$

где $\Phi[...]$ — нормированная функция Лапласа; $\overline{x}_j$ — среднее значение $j$-го показателя качества; $S_{x_j}$ и $S_{x_j^{\max(\min)}}$ — среднеквадратические отклонения значений $j$-го показателя качества и его предельно допустимого значения (для практических расчетов $S_{x_j^{\max(\min)}} = 0$); $\partial F_j/\partial z_m$ и $\partial F_j/\partial z_k$ — частные производные функции $F_j = F_j(z_1, ..., z_L)$, которая является информационной моделью и характеризует образование в обрабатываемой заготовке отказа по $j$-му показателю качества по факторам $z_1, ..., z_L$, оказывающим наиболее существенное влияние на возникновение рассматриваемого отказа, при их средних значениях; $\sigma_{z_m}$, $\sigma_{z_k}$ — среднеквадратические отклонения значений факторов $z_m$ и $z_k$ соответственно; $\rho_{mk}$ — коэффициент корреляции между факторами $z_m$ и $z_k$.

Использование методов теории массового обслуживания для прогнозирования значений $P_{\text{н.1}.j}$ основано на моделировании процесса образования рассматриваемого отказа работой многоканальной СМО с последовательно включающимися группами независимых каналов обслуживания. Требованием на обслуживание в такой СМО является заготовка, поступившая для обработки на технологическую операцию. Под обслуживанием требования предлагается понимать обработку детали без образования моделируемого отказа. В соответствии с графом состояний СМО (рис. 2) возможны следующие состояния системы: "0" — готовность "системы к обслуживанию" или "завершенное обслуживание", "1" — требование обслуживается в одном канале; "2" — требование обслуживается в двух каналах,..., "$k$" — требование обслуживается в $k$ каналах системы.

Интенсивности переходов СМО из состояния в состояние предлагается оценивать выражениями:

$$\left.\begin{aligned} &\lambda_{01.j} = \lambda_{12.j} = ... = \lambda_{k_j-1.k_j} = 1/x_j^{\max(\min)}; \\ &\mu_{10.j} = 1/\overline{x}_j;\ \mu_{k_j.k_j-1} = k_j\mu_{10.j}, \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Число $k_j$ каналов обслуживания СМО принимается равным целому числу, удовлетворяющему одному из следующих равенств:

$$k_j = \min_L\left\{\left[\frac{z_{jm}^{\max(\min)}}{\overline{z}_{jm}}\right]\right\},\ m = 1, ..., L, \\ \text{при } \overline{z}_{jm} < z_{jm}^{\max(\min)}; \qquad (9)$$

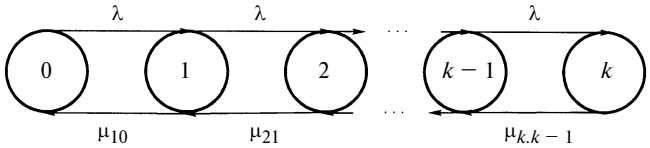



**Рис. 2. Граф состояний многоканальной СМО с последовательно включающимися группами независимых каналов обслуживания, моделирующей развитие $j$-го преимущественного вида отказа по показателям качества обрабатываемой детали**

$$k_j = \min_L \left\{ \left[ \frac{\overline{z}_{jm}}{z_{jm}^{\max(\min)}} \right] \right\}, \; m = 1, ..., L,$$

$$\text{при } \overline{z}_{jm} > z_{jm}^{\max(\min)}, \qquad (10)$$

где $z_{jm}$ — технологический фактор, изменение которого оказывает наиболее существенное влияние на значение $j$-го показателя качества обрабатываемой детали; $\overline{z}_{jm}$, $z_{jm}^{\max(\min)}$ — значения факторов $z_{jm}$, соответствующие $\overline{x}_j$ и $x_j^{\max(\min)}$ соответственно; $\left[ \frac{\cdot\cdot\cdot}{\cdot\cdot\cdot} \right]$ — целая часть отношения.

Вероятность состояния "$k_j$" рассматриваемой системы соответствует вероятности того, что в результате обработки была получена деталь с $j$-м показателем качества, значение которого превышает соответствующую предельно допустимую величину. Решение системы уравнений Колмогорова, описывающей функционирование данной СМО в стационарном режиме [2], дает следующую зависимость для вероятности $P_{\text{н}.1.j}$:

$$P_{\text{н}.1.j} = 1 - \left[ 1 + \left( \frac{\mu_{10.j}}{\lambda_{01.j}} \right) \frac{k_j!}{(k_j - 1)!} + \right.$$

$$\left. + \left( \frac{\mu_{21.j}}{\lambda_{12.j}} \right)^2 \frac{k_j!}{(k_j - 2)!} + ... + \left( \frac{\mu_{k_j.k_j-1}}{\lambda_{k_j-1.k_j}} \right)^{k_j} k_j! \right]^{-1}, \qquad (11)$$

где значения $\mu$ и $\lambda$ рассматриваются по выражению (8).

Значения величин $x_j$ и $S_{x_j}$ при $j = 1, ..., 3$ определяли на основе математического моделирования процесса токарной обработки. При разработке модели было принято допущение, что значение радиус-вектора $\overline{r}\Delta i(\tau)$ $i$-й точки поперечного сечения детали в системе координат, центр которой лежит на оси вращения обрабатываемой детали, может быть получено из анализа размерной цепи системы СПИД по выражению

$$\vec{r}_{\Delta i}(\tau) = \vec{r}_c + \Delta\vec{r}_{\text{о}i}(\tau) + \Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau), \qquad (12)$$

где $\vec{r}_c$ — известный настроечный размер ТС; $\Delta\vec{r}_{\text{о}i}(\tau)$, $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$ — составляющие величины $\vec{r}_{\Delta i}(\tau)$, обусловленные упругими отжатиями и вибрациями ТС соответственно.

Для определения величин $\Delta\vec{r}_{\text{о}i}(\tau)$ и $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$, входящих в выражение (12), реальная ТС представляется в виде нестационарной модели упругой системы (УС) с двумя степенями свободы, расчетная схема которой приведена на рис. 3, где $\nu_1$, $\nu_2$ — главные оси жесткости рассматриваемой УС; $C_1(\tau)$, $C_2(\tau)$, $\beta(\tau)$ — переменные во времени параметры этой УС, подробный расчет которых приведен в работе [3].

Анализ представленной расчетной схемы позволяет установить, что упругие отжатия ТС в радиальном направлении под действием результирующей силы $P$ резания таковы:

$$\Delta\vec{r}_{\text{о}i}(\tau) = P\left( \frac{\cos(\beta(\tau) - \varepsilon)\sin\beta(\tau)}{C_2(\tau)} + \frac{\sin(\beta(\tau) - \varepsilon)\cos\beta(\tau)}{C_1(\tau)} \right), \qquad (13)$$

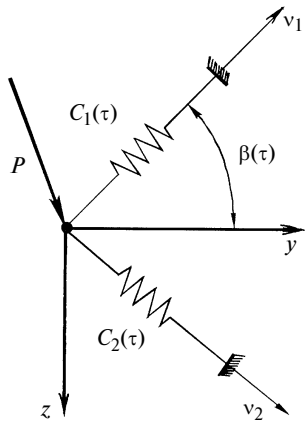



**Рис. 3. Расчетная схема УС с двумя степенями свободы, используемая при моделировании процесса формообразования при точении**

где $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$; $\varepsilon = \text{arctg}\frac{P_y}{P_z}$ ($P_y$, $P_z$ — радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, определяемые по известным зависимостям теории резания).

Для определения составляющей $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$ примем, что ее значения обусловлены вынужденными колебаниями УС "станок — деталь — инструмент", возбуждаемыми переменной во времени силой резания. Будем считать, что изменение силы резания в процессе обработки обусловлено изменением фактической глубины резания, связанным с непостоянством припуска на обработку.

В соответствии с представленной расчетной схемой вынужденные колебания рассматриваемой УС с учетом сил сопротивления, пропорциональных скорости движения системы по осям $\nu_1$ и $\nu_2$, могут быть описаны следующей системой линейных нестационарных дифференциальных уравнений:

при учете составляющей $P_z$:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2\nu_1}{d\tau^2} + h_1\frac{d\nu_1}{d\tau} + C_1(\tau)\nu_1 = P_z\sin(\beta(\tau)); \\ m\frac{d^2\nu_2}{d\tau^2} + h_2\frac{d\nu_2}{d\tau} + C_2(\tau)\nu_2 = P_z\cos(\beta(\tau)); \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

при учете составляющей $P_y$:

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2\nu_1}{d\tau^2} + h_1\frac{d\nu_1}{d\tau} + C_1(\tau)\nu_1 = -P_y\cos(\beta(\tau)) \\ m\frac{d^2\nu_2}{d\tau^2} + h_2\frac{d\nu_2}{d\tau} + C_2(\tau)\nu_2 = P_y\sin(\beta(\tau)). \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Перемещение УС "станок — деталь — инструмент" в направлении оси $y$ связано с перемещениями в направлении осей $\nu_1$ и $\nu_2$ выражением:

$$y(\tau) = \nu_2(\tau)\sin\beta(\tau) + \nu_1(\tau)\cos\beta(\tau). \qquad (16)$$

Результаты исследований, проведенных в работе [4], позволяют считать, что связь между изменением составляющих $P_z$, $P_y$ силы резания и изменением глубины резания может быть достаточно точно представлена линейным дифференциальным уравнением

$$T_{p_{z(y)}}\frac{dP_{z(y)}}{d\tau} + P_{z(y)} = K_{p_{z(y)}}\Delta t(\tau), \qquad (17)$$

где $T_{p_{z(y)}}$ — инерционные постоянные времени, характеризующие "отставание" изменения составляющих силы резания при изменении глубины срезаемого слоя; $K_{p_{z(y)}}$ — статические характеристики составляющих силы резания, характеризующие приращение составляющей силы резания при изменении глубины резания на 1 мм; $\Delta t(\tau)$ — отклонение глубины резания от среднего значения.

Для расчета величин $T_{p_{z(y)}}$ можно использовать выражения:

$$T_{p_z} = 1{,}5\frac{a\xi}{\nu};\ T_{p_y} = \left(1 + \frac{1}{\mu\xi}\right)\frac{a\xi}{\nu}, \qquad (18)$$

где $a$ — толщина срезаемого слоя; $\xi$ — усадка стружки; $v$ — скорость резания; $\mu$ — коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца.

Уравнения для определения $K_{p_{z(y)}}$, полученные на основе линеаризации зависимостей для составляющих силы резания путем их разложения в ряд Тейлора в окрестности точки $t = t_0$, имеют вид:

$$K_{P_{z(y)}} = x_{P_{z(y)}} C_{P_{z(y)}} t_0^{x_{P_{z(y)}}-1} S^{y_{P_{z(y)}}} \nu^{n_{P_{z(y)}}} k_{P_{z(y)}}, \qquad (19)$$

где $t_0$, $S$, $\nu$ — средние значения глубины резания, подачи и скорости резания соответственно; $C_{P_{z(y)}}$, $k_{P_{z(y)}}$, $x_{P_{z(y)}}$, $y_{P_{z(y)}}$, $n_{P_{z(y)}}$ — постоянные и показатели степени, характерные для выбранных условий обработки.

Из выражений (14)—(19) получаем систему уравнений, определяющую при принятых допущениях динамику процесса формирования величины $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$

при учете составляющей $P_z$ силы резания:

$$\left.\begin{aligned}
&T_{p_z}\frac{dP_z}{d\tau} + P_z = K_{p_z}\Delta t(\tau),\\
&m\frac{d^2\nu_1}{d\tau^2} + h_1\frac{d\nu_1}{d\tau} + C_1(\tau)\nu_1 = P_z\sin(\beta(\tau)),\\
&m\frac{d^2\nu_2}{d\tau^2} + h_2\frac{d\nu_2}{d\tau} + C_2(\tau)\nu_2 = P_z\cos(\beta(\tau)),\\
&\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_z}(\tau) = y(\tau) = \nu_2(\tau)\sin\beta(\tau) + \nu_1(\tau)\cos\beta(\tau);
\end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

при учете составляющей $P_y$ силы резания:

$$\left.\begin{aligned}
&T_{p_y}\frac{dP_y}{d\tau} + P_y = K_{p_y}\Delta t(\tau),\\
&m\frac{d^2\nu_1}{d\tau^2} + h_1\frac{d\nu_1}{d\tau} + C_1(\tau)\nu_1 = -P_z\cos(\beta(\tau)),\\
&m\frac{d^2\nu_2}{d\tau^2} + h_2\frac{d\nu_2}{d\tau} + C_2(\tau)\nu_2 = P_z\sin(\beta(\tau)),\\
&\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_y}(\tau) = y(\tau) = \nu_2(\tau)\sin\beta(\tau) + \nu_1(\tau)\cos\beta(\tau),
\end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

где $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_z}(\tau)$, $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_y}(\tau)$ — составляющие $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$, обусловленные действием составляющих $P_z$ и $P_y$ силы резания соответственно.

Показатели $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$, $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_z}(\tau)$ и $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_y}(\tau)$ связаны между собой выражением

$$\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau) = \Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_z}(\tau) + \Delta\vec{r}_{\text{в}i}^{\,P_y}(\tau). \qquad (22)$$

Системам уравнений (20)—(22) соответствует структурная схема замкнутой системы автоматического управления (САУ), представленная на рис. 4, где $W_1(\rho, \tau)$, $W_2(\rho, \tau)$, $W_3(\rho, \tau)$, $W_4(\rho, \tau)$ — передаточные функции динамических нестационарных элементов, отвечающие второму и третьему уравнениям систем (20) и (21) соответственно ($p$ — оператор дифференцирования); $W_{P_z}$, $W_{P_y}$ — передаточные функции, отвечающие первым уравнениям указанных систем.

В качестве входного сигнала представленной САУ рассматривается массив $\Delta t(\tau)$ отклонений фактической глубины резания от ее среднего значения, в качестве выходного — $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$.

При расчете значений $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$ примем, что поступающая на вход САУ параметр $\Delta t(\tau)$ в любом поперечном сечении детали может быть представлена в виде совокупности конечного числа гармонических составляющих:

$$\Delta t(\tau) = c_0 + \sum_{i=1}^{q} c_i\cos(i\omega\tau + \psi_i), \qquad (23)$$

где $q$ — число гармоник; $\omega = 2\pi n$ ($n$ — частота вращения шпинделя); $c_i$, $\psi_i$ — амплитуда и фаза $i$-й гармоники разложения в ряд Фурье величины отклонения фактической глубины резания от среднего значения.

Параметр $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$ может быть представлен в виде:

$$\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau) = c'_{\text{о}} + \sum_{i=1}^{q} c'_i\cos(i\omega\tau + \psi'_i)\ . \qquad (24)$$

Величины $c'_i$ и $\psi'_i$ связаны с величинами $c_i$, $\psi_i$ выражениями:

$$c'_i = c_i|W(j\omega, \tau)|;\ \psi'_i = \psi_i + \arg W(j\omega, \tau), \qquad (25)$$

где $|W(j\omega, \tau)|$ и $\arg W(j\omega, \tau)$ — амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики рассматриваемой САУ.

Выражения (24), (25) позволяют по известному значению (23) входного сигнала $\Delta t(\tau)$ рассчитать величину

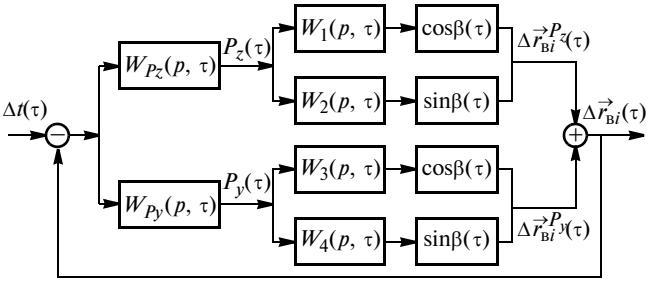



**Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы автоматического управления, моделирующая процесс формирования величины $\Delta\vec{r}_{\text{в}i}(\tau)$**

составляющей $\Delta\vec{r}_{вi}(\tau)$, обусловленной вибрациями УС "станок — деталь — инструмент".

При построении профиля продольного сечения детали, получаемого в результате обработки, для формирования массива значений $\Delta t(\tau)$ примем, что глубина резания является нормально распределенной случайной величиной, которая характеризуется параметрами:

$$t_0 = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{4} - \vec{r}_c;\ \sigma_t = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{12}, \qquad (26)$$

где $d_{\max}$ и $d_{\min}$ — максимальный и минимальный диаметры заготовки, поступающей на операцию токарной обработки.

Получаемый в результате моделирования профиль поперечного сечения детали используется в дальнейшем для расчета средних значений диаметра детали и отклонения от круглости. При этом базой отсчета служит окружность, проведенная по методу наименьших квадратов [5].

В качестве информационной модели, характеризующей влияние основных технологических факторов на формируемые в процессе обработки значения параметра $Ra$ ($j = 4$) и используемой в дальнейшем для определения числа каналов обслуживания СМО, которая моделирует образование отказа, связанного с превышением указанным параметром его предельно допустимого значения, использовалось выражение [6]

$$Ra = 0{,}85\frac{t^{0,31}s^{0,58}\varphi^{0,4}\varphi_1^{0,4}}{\nu^{0,06}r^{0,66}HB^{0,05}}, \qquad (27)$$

где $S$ — подача; $\varphi$, $\varphi_1$ — соответственно главный и вспомогательный углы в плане режущего инструмента, $\nu$ — скорость резания; $r$ — радиус при вершине режущего инструмента; $HB$ — твердость материала заготовки.

Рассмотренная в работе методика была использована при прогнозировании надежности операции черновой токарной обработки шейки ($\varnothing 54_{-0,5}$ мм) оси поддерживающего катка 04.33А.101-4 гусеничного пропашного трактора Т4-А ОАО "Алттрак". При проведении расчетов в соответствии с действующим вариантом технологического процесса были приняты следующие исходные данные:

приведенные в табл. 2 предельно допустимые значения показателей качества, контролируемых на рассматриваемой операции;

заготовка — из стали 45 твердостью 260 НВ, $\varnothing 56^{+1,6}_{-0,8}$ мм, длина обрабатываемой детали $l = 352$ мм;

режимы резания по действующему варианту технологического процесса: скорость резания $v = 67{,}8$ м/мин ($N = 400$ об/мин), подача $S = 0{,}5$ мм/об, глубина резания $t = 1{,}25$ мм;

инструмент — из твердого сплава Т15К6 с геометрическими параметрами: передний угол $\gamma = 15°$, задний угол $\alpha = 12°$, главный угол в плане $\varphi = 90°$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 10°$, радиус при вершине $r = 1$ мм;

приведенные в табл. 3 значения постоянных выражения (20) для расчета тангенциальной $P_z$ и радиальной $P_y$ составляющих силы резания и статических характеристик силы резания;

*Таблица 2*

| Показатель качества | Предельное значение |
|---|---|
| Максимальный диаметр $D^{\max}$ | 54 мм |
| Минимальный диаметр $D^{\min}$ | 53,5 мм |
| Отклонение от круглости $\Delta R^{\max}$ | 0,25 мм |
| Шероховатость поверхности $Ra^{\max}$ | 12,5 мкм |

*Таблица 3*

| Составляющая силы резания | $C_P$ | $x_P$ | $y_P$ | $n_P$ | $k_P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Тангенциальная $P_z$ | 300 | 1 | 0,75 | −0,15 | 0,82 |
| Радиальная $P_y$ | 243 | 0,9 | 0,6 | −0,3 | 0,82 |

обработка проводится на токарном гидрокопировальном полуавтомате ЕМ 473; динамические характеристики оборудования, используемые для расчета $C_1(\tau)$, $C_2(\tau)$, $\beta(\tau)$ (в обозначениях работы [3]): минимальное и максимальное значения жесткости УС "резец — суппорт" $C_1' = 2400$, $C_2' = 7400$ кг/мм; угол, определяющий направление главных осей жесткости УС "резец — суппорт", $\beta = 36°$; жесткость опор станка $C_{оп} = 4200$ кг/мм; коэффициенты сил сопротивления $h_1 = h_2 = 0{,}2$ кг · с/мм;

базирование детали — в центрах;

настроечный размер технологической системы $r_c = 26{,}87$ мм;

коэффициенты усадки стружки и трения стружки о переднюю поверхность резца — $\xi = 3{,}6$, $\mu = 0{,}4$.

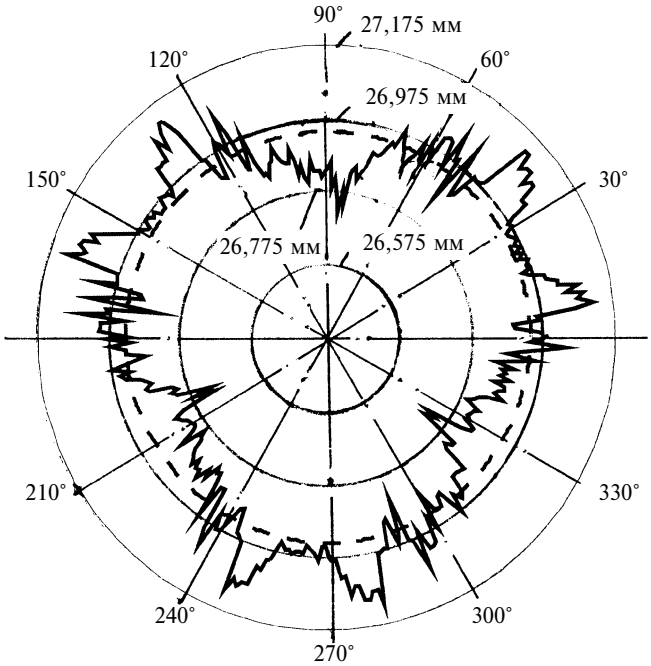



**Рис. 5. Расчетный профиль поперечного сечения детали, полученный в результате моделирования:**
——— — расчетный профиль детали; - - - - — окружность по квадратам

*Таблица 4*

| $j$ | Показатель качества $x_j$ | Расчетное среднее значение $\bar{x}_j$ | Расчетное среднеквадратическое отклонение $S_{x_j}$ (7), или число $k_j$ (9)(10) каналов обслуживания СМО | Вероятность $P_{н.1.j}$ отсутствия отказа по показателю качества |
|---|---|---|---|---|
| $j = 1$, $j = 2$ | $D$ | $D = 53{,}811$ мм | $S_D = 0{,}098$ мм | $P_{н.1.1} = 0{,}90$ $P_{н.1.2} = 0{,}9999$ |
| $j = 3$ | $\Delta R$ | $\Delta R = 0{,}071$ мм | $S_{\Delta R} = 0{,}050$ мм | $P_{н.1.3} = 0{,}9999$ |
| $j = 4$ | $Ra$ | $Ra = 6$ мкм | $k_4 = 3$ | $P_{н.1.4} = 0{,}9995$ |
| Вероятность отсутствия отказов по контролируемым показателям качества | | | | $P_{н.1} = 0{,}9235$ |

На рис. 5 представлен расчетный профиль одного из поперечных сечений обрабатываемой детали, использованный для расчета значений показателей качества детали.

Результаты расчета значений показателей $x_j$ качества их среднеквадратических отклонений $S_{x_j}$ и числа $k_j$ каналов обслуживания СМО по предлагаемым моделям, а также вероятности $P_{н.1.j}$ [уравнения (4)—(7), (11)] отсутствия каждого из рассматриваемых видов отказов представлены в табл. 4. Приведено также расчетное (3) значение надежности $P_{н1}$ рассматриваемой операции по показателям качества обрабатываемой детали.

Результаты представленной работы позволяют сделать следующие выводы: разработан комплекс вероятностных моделей, предназначенных для прогнозирования надежности операций токарной обработки по контролируемым показателям качества. Рассчитываемые на основе теоретического анализа процессов формирования показателей качества обрабатываемой детали параметры вероятностных моделей дают возможность количественно оценить влияние на надежность технологической операции основных технологических факторов. Особенность функционирования СМО позволяет считать получаемые величины $P_{н.1}$ "нижними" оценками надежности технологической операции. Применение предлагаемой методики для оценки надежности операции черновой токарной обработки оси поддерживающего катка гусеничного пропашного трактора Т4-А показало, что расчетные значения возможного брака достаточно хорошо согласуются с производственными данными — расхождение не превышает 3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Степанский Л. Г.** Прогнозирование надежности деформирующего инструмента: Учеб. пособие. М.: МГТУ "Станкин", 1995. 99 с.
2. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: Учебник. 4-е изд. М.: Наука, 1969. 576 с.
3. **Лазарев Г. С.** Автоколебания при резании металлов. М.: Высшая школа, 1971. 243 с.
4. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
5. **Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н.** Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
6. **Качество** машин: Справочник: В 2 т. Т. 1. / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун и др. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.


---


УДК 621.002.3:678.5



О. Ю. ЕРЕНКОВ, С. П. ЗАХАРЫЧЕВ, кандидаты технических наук, А. В. ГАВРИЛОВА, Д. В. ОТМАХОВ
(Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск)


# Влияние условий механической обработки полимерных материалов на твердость обработанной поверхности детали


Представлены результаты экспериментальных исследований по определению твердости обработанной поверхности в зависимости от условий и вида механической обработки заготовок из фторопласта-4, текстолита и капролона. Приведены методика проведения экспериментов, анализ причин изменения твердости обработанной поверхности для предложенных вариантов механической обработки исследуемых материалов. Получены результаты исследования влияния упругого последействия полимерного материала на изменение твердости обработанной поверхности заготовок.


Свойства обработанной поверхности деталей формируются в основном на конечной стадии технологического процесса их изготовления. В технологическом процессе изготовления деталей из полимерных материалов в большинстве случаев на конечной стадии проводят механическую обработку резанием для придания детали надлежащего внешнего вида, изменения конфигурации, полученной в процессе формования, обеспечения размерной точности и требуемого качества обработанной поверхности. Качество обработанной поверхности характеризуется шероховатостью и физико-механическими свойствами материала, образующего поверхностный слой детали. От качества поверхностного слоя зависят: прочность детали, прочность соединений с натягом и стабильность подвижных соединений, износостойкость, коррозионная

стойкость, оптические, химические и антифрикционные свойства.

Одним из основных физико-механических свойств конструкционных материалов является твердость. Твердость, определяемая вдавливанием наконечника, характеризует сопротивление пластической деформации, при этом измерение твердости можно рассматривать как местные механические испытания поверхностных слоев материала. Измерение твердости имеет широкое и универсальное значение. Результаты измерений твердости могут служить базой для определения коэффициента упрочнения, уровня остаточных напряжений, степени деструкции поверхностного слоя, предела текучести, предела прочности и истинного сопротивления разрыву материала.

Как известно [1], механическая обработка металлов и их сплавов сопровождается явлением наклепа поверхностного слоя, которое оценивается степенью упрочнения материала заготовки. Однако процесс резания металлов существенно отличается от резания полимерных материалов. В связи с этим исследование твердости обработанной поверхности полимерных материалов является важной научно-практической задачей, решение которой позволит повысить уровень информации о свойствах полимерных материалов и, соответственно, более эффективно применять детали и изделия из них.

Цель экспериментальных исследований — определение твердости обработанной поверхности в зависимости от условий механической обработки заготовок из полимерного материала и времени выдержки после проведения обработки.

В качестве исследуемых материалов были выбраны такие представители термопластичных и термореактивных пластмасс, детали и изделия из которых широко применяются в машиностроении, а именно: капролон, фторопласт-4 и текстолит в виде заготовок круглого сечения диаметром 40 мм. Эти материалы значительно отличаются друг от друга, в том числе и технологией производства. Текстолит круглого сечения — это слоистый прессованный материал, изготовленный методом намотки и состоящий из нескольких слоев хлопчатобумажной ткани, пропитанной термореактивным связующим на основе фенолформальдегидной смолы. Заготовки из капролона получают методом "химического" формования, т. е. путем полимеризации капролактама непосредственно в форме. Технология получения заготовок из фторопласта-4 включает следующие стадии: таблетирование заготовок из порошка в пресс-формах, спекание таблеток в печах, охлаждение изделий в печах, на воздухе или в воде.

Эксперименты проводили в такой последовательности. На начальном этапе измеряли твердость необработанных заготовок в соответствии с положениями ГОСТ 4670—91 путем вдавливания стального шарика в испытуемый образец по методу Бринелля. Затем проводили токарную обработку одной части заготовок, а другую часть подвергали комбинированной обработке: предварительному сжатию и последующей токарной обработке. Далее определяли твердость обработанной поверхности. Величина сжимающего усилия на стадии предварительного сжатия заготовок составляла [2] $\sigma_н < (0,6 \div 0,8)\sigma_в$, где $\sigma_н$ — напряжения, создаваемые в заготовке усилием растяжения/сжатия; $\sigma_в$ — предел вынужденной эластичности полимерного материала (в случае текстолита вместо величины $\sigma_в$ следует подставлять значение разрывного напряжения $\sigma_р$).

Завершающий этап эксперимента заключался в исследовании стабильности твердости материала заготовок, подвергшихся токарной и комбинированной обработке, в течение длительного времени. В данных исследованиях длительность выдержки заготовок составляла 120 ч. Условия хранения заготовок (температура, влажность, уровень освещенности) поддерживались постоянными в течение всего эксперимента. Токарную обработку проводили на универсальном токарно-винторезном станке 16К20. Режимы резания, материал и геометрические параметры режущего инструмента выбирали на основе результатов ранее проведенных исследований [3]. Сравнительную оценку изменения прочности конкретного материала для каждого способа обработки можно провести с помощью коэффициента упрочнения, который рассчитывается по формуле $N = (HB_о - HB_н)/HB_н$, где $HB_о$ — твердость обработанной поверхности заготовки; $HB_н$ — начальная твердость необработанной поверхности заготовки.

Положительное значение коэффициента $N$ свидетельствует о повышении твердости обработанной поверхности, а отрицательное означает, что имеет место разупрочнение материала заготовки.

В таблице сведены результаты определения твердости как исходного материала, так и обработанной поверхности заготовок, а также соответствующие значения коэффициентов упрочнения.

Сопоставление данных эксперимента показывает, что токарная обработка заготовок из термопластов как без предварительного сжатия, так и после него приводит к повышению твердости обработанной поверхности: коэффициент упрочнения в случае обработки капролона составляет соответственно 0,21 и 0,15, фторопласта — 0,175 и 0,13. Для текстолита же он равен соответственно −0,11 и −0,023. Это свидетельствует о том, что твердость текстолита снижается после соответствующих обработок.

Повышение твердости кристаллических полимерных материалов (капролон, фторопласт) при их обработке резанием может быть объяснено следующим образом. Как известно [4], при механическом воздействии на кристаллические полимерные материалы имеют ме-

**Данные по твердости материала заготовок**

| Способ обработки заготовок | Твердость, МПа, по Бринеллю и коэффициент упрочнения, %, заготовок из | | |
|---|---|---|---|
| | капролана | фторопласта | текстолита |
| Точение | 171,6 и 0,21 | 36,1 и 0,175 | 179,4 и −0,11 |
| Предварительное сжатие + + точение | 164,8 и 0,15 | 34,4 и 0,13 | 191,8 и −0,023 |
| Необработанные заготовки | 142,8; — | 30,7; — | 198,2; — |

сто структурные изменения, сопровождающиеся ростом кристаллической фазы материала. Кристаллизация полимеров приводит к повышению твердости, модуля упругости, прочности и других механических характеристик, так как твердость, прочность и плотность закристаллизированного полимера выше, чем аморфного. Таким образом, с учетом установленного факта [5] упругопластического деформирования обрабатываемого материала в зоне резания можно заключить, что при резании капролона и фторопласта происходит рекристаллизация и упрочнение поверхностного слоя вследствие увеличения содержания кристаллической фазы.

Кроме того, в поверхностном слое необработанной заготовки, как правило, имеются первоначальные дефекты в виде трещин и микротрещин, что обусловлено наличием неравномерно распределенных в объеме изделия термических напряжений, обязанных своим происхождением более высокой скорости остывания поверхностных слоев заготовки по сравнению с его внутренними слоями вследствие большой теплоемкости и низкой теплопроводности полимера. При взаимодействии материала заготовки и режущего инструмента происходит удаление дефектного слоя материала, что является дополнительной предпосылкой повышения прочности обработанной поверхности.

Для данных материалов (капролон, фторопласт), как показывают значения коэффициента упрочнения, наблюдается снижение прочности обработанной поверхности в случае комбинированной обработки (предварительное сжатие и последующая токарная обработка) по сравнению с твердостью после традиционного точения. Предварительное сжатие заготовки приводит к возникновению в объеме заготовки растягивающих напряжений после снятия сжимающей нагрузки. Во время последующей токарной обработки растягивающие напряжения частично компенсируют сжимающие напряжения в зоне резания, вследствие чего эффективность процесса рекристаллизации материала снижается. Это способствует уменьшению степени кристалличности материала и, соответственно, его твердости.

При механической обработке резанием слоистых полимерных материалов типа текстолита происходит разрушение целостности поверхностного слоя детали, удаляется наружный слой полимеризованного связующего, перерезаются армирующие волокна и происходит их разлохмачивание. Все это вместе приводит к образованию дефектного, деструктированного поверхностного слоя, физико-химические характеристики которого значительно отличаются от характеристик исходной структуры. Предварительное сжатие заготовок приводит к охрупчиванию части материала, что позволяет несколько снизить уровень термомеханической деструкции поверхностного слоя заготовки при последующей токарной обработке, о чем свидетельствует соответствующее увеличение твердости обработанной поверхности текстолита.

В данной серии экспериментов точение заготовок осуществлялось при подаче 0,20 мм/об. Как известно [3], величина продольной подачи оказывает значительное влияние на формирование обрабатываемой поверхности заготовок из полимерных материалов. Представляет практический интерес исследование влияния подачи на твердость обрабатываемой поверхности заготовки.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные в виде графических зависимостей твердости материала обрабатываемых заготовок от подачи. Анализ полученных зависимостей показывает, что для каждого исследуемого материала, независимо от способа обработки заготовок, твердость имеет приблизительно постоянные значения до определенной подачи $S_{опт}$. Так, в случае обработки капролона $S_{опт} \approx 0{,}17$ мм/об, для фторопласта $S_{опт} \approx 0{,}15$ мм/об и для текстолита $S_{опт} \approx 0{,}13$ мм/об. При превышении подачи $S_{опт}$ наблюдается плавное снижение твердости обработанной поверхности всех заготовок. Такой характер изменения твердости можно объяснить тем, что с превышением определенного значения подачи увеличивается высота неровностей на обработанной поверхности. Увеличение шероховатости поверхности приводит к ее растрескиванию охрупчиванию и, следовательно, к снижению сопротивляемости материала пластической деформации.

Подтверждением данного положения могут выступить микрофотографии стружек, представленные на рис. 2 и 3. В случае токарной обработки термопластичного материала типа капролона видно, что полученная при подаче 0,15 мм/об стружка (см. рис. 2, *а*) является сливной, а стружка, полученная при подаче 0,25 мм/об (см. рис. 2, *б*), — непрерывной стружкой скалывания. В случае повышения подачи при точении текстолита увеличиваются размеры отделяющихся частиц стружки

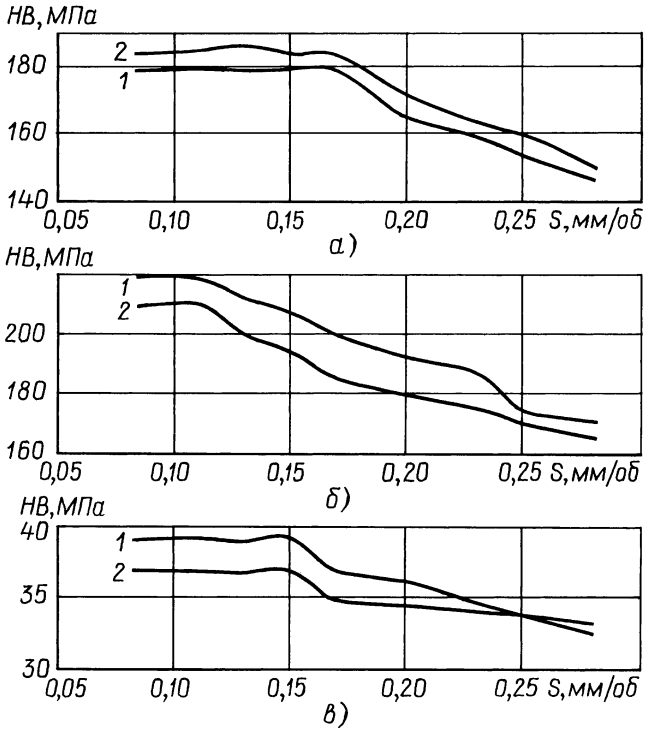
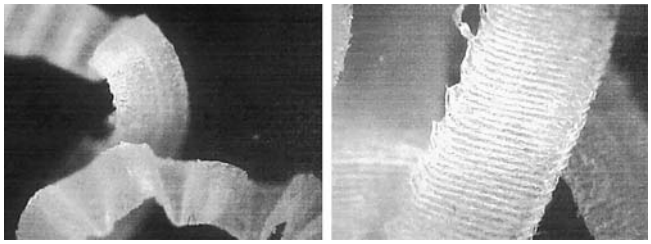
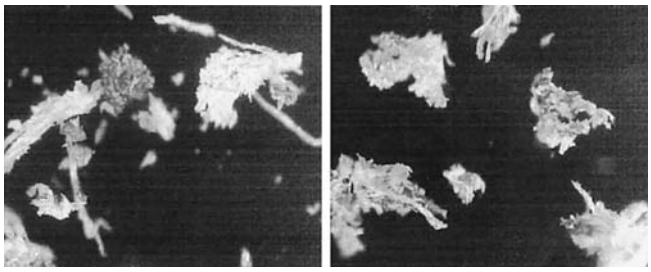



**Рис. 1. Зависимости твердости обработанной поверхности капролона (*а*), текстолита (*б*) и фторопласта (*в*) от подачи при точении (*1*) и точении с предварительным сжатием (*2*)**



*а*) *б*)

**Рис. 2. Микрофотографии фрагментов стружки, полученной при точении капролона с подачей 0,15 (*а*) и 0,25 мм/об (*б*)**



*а*) *б*)

**Рис. 3. Микрофотографии фрагментов стружки, полученной при точении текстолита с подачей 0,13 (*а*) и 0,23 мм/об (*б*)**

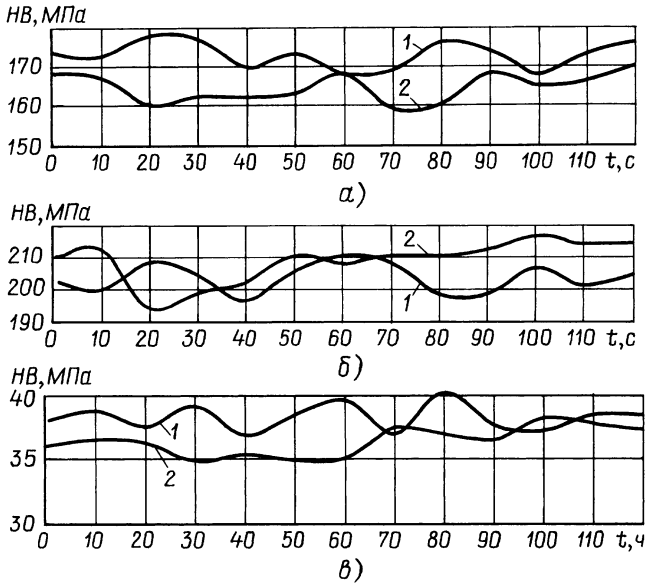



**Рис. 4. Зависимости твердости обработанной поверхности капролона (*а*), текстолита (*б*) и фторопласта (*в*) от времени выдержки после обработки точением (*1*) и точением с предварительным сжатием (*2*)**

надлома (см. рис. 3, *а*, *б*). Изменение характера процесса стружкообразования свидетельствует о повышении шероховатости обработанной поверхности соответствующих заготовок.

Существенное влияние на качественные показатели обработанной поверхности оказывает явление упругого последействия полимерного материала после механической обработки заготовки. Данное явление приводит к образованию внутренних остаточных напряжений, которые могут повлиять на изменение прочностных показателей детали через некоторый промежуток времени [1, 3]. Для проверки этого предположения провели измерение твердости спустя некоторое время после окончания токарной и комбинированной обработок, максимальное время выдержки составляло 120 ч.

На рис. 4, *а*—*в* представлены графики зависимости твердости обработанной точением поверхности от времени выдержки заготовок до измерения. Как следует из анализа данных, выдержка исследуемых образцов до начала измерения незначительно влияет на его конечный результат. Наблюдаемые незначительные (в пределах 5 ÷ 8 %) отклонения твердости поверхности исследуемых материалов после токарной и комбинированной обработок объясняются неравномерностью распределения фаз по длине и сечению заготовки, наличием и случайным расположением микродефектов в объеме материала. В случае обработки текстолита колебания значений твердости в значительной степени обусловлены высокой гетерогенностью структуры материала.

Таким образом, на основании изложенных выше результатов исследований можно сделать следующее заключение.

1. Токарная обработка заготовок из капролона и фторопласта-4 приводит к повышению твердости обработанной поверхности; точение заготовок после их предварительного сжатия также приводит к упрочнению поверхностного слоя, однако при этом варианте обработки степень упрочнения меньше, чем при традиционной токарной обработке.

2. В случае обработки заготовок из текстолита имеет место разупрочнение обработанной поверхности как при токарной, так и при комбинированной обработке.

3. Для каждого исследуемого материала, независимо от способа обработки заготовок, прочность имеет приблизительно постоянные значения до определенной подачи, при превышении которой наблюдается плавное снижение твердости обработанной поверхности.

4. Упругое восстановление материала после проведения токарной или комбинированной обработки на значение твердости при выбранных условиях обработки не влияет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подураев В. Н.** Технология физико-химических методов обработки. М: Машиностроение, 1985. 264 с.

2. **Еренков О. Ю.** Исследование комбинированного способа токарной обработки заготовок из полимерных материалов после предварительного термомеханического воздействия // Вестник машиностроения. 2006. № 7. С. 30—33.

3. **Штучный Б. П.** Механическая обработка пластмасс: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.

4. **Карташов Э. М., Цой Б., Шевелев В. В.** Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. М.: Химия, 2002. 736 с.

5. **Кабалдин Ю. Г., Шпилев А. М.** Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика и управление. Владивосток: Дальнаука, 1998. 296 с.

УДК 621.9

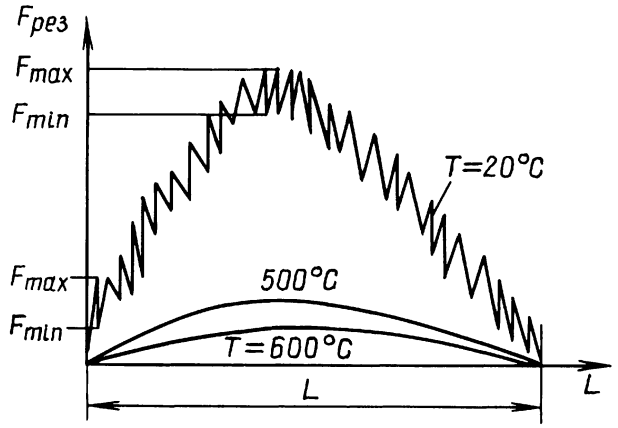
В. И. КОТЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук (НГТУ), А. О. КРАСНОВ (НВВИКУ, г. Н. Новгород)

# Изменение усилия резания при обработке наплавленного слоя

Резание наплавленного металла проводили на токарном станке 16К20 резцом с напаянной пластиной из ВК6М. Слой металла наплавляли методом электросварки на цилиндрический образец из стали 45 диаметром 45 мм. На металлический стержень (основу) наплавляли металл вдоль образца, тангенциально и поперек образца. Хвостовик образца длиной 100 мм оставался свободным от наплавки для зажима в патрон токарного станка. При резании измеряли температуру нагрева срезаемого слоя металла и усилие резания. Результаты сравнивали с опубликованными данными других исследователей.

Обычное "холодное" резание проводили, соблюдая следующие режимы резания: $S = 0{,}28$ мм/об; $t = 0{,}5$ мм; $v = 47{,}5$ м/мин. Резание с нагревом вели при тех же режимах с увеличением глубины резания $t$ от 0,5 до 4,0 мм. Срезаемый резцом слой состоял из наложенных последовательно один за другим валиков наплавленного металла. Изменение силы резания по длине валика показано на рисунке.

Усилие резания колеблется при срезании вершины наплавленного слоя от $F_{max} = 1661{,}1$ Н до $F_{min} = 1308$ Н, а при резании в начале и в конце валика от $F_{max} = 882$ Н до $F_{min} = 502$ Н. При резании с нагревом $F_{max} = 438$ Н, $F_{min} = 0$. Резание наплавленного валика состоит из периодически повторяющихся элементов процесса стружкообразования. Давление режущего клина вызывает смятие металла и напряжения в нем, затем идет образование микротрещин, одна из которых является определяющей для пластического сдвига напряженных, но недеформированных кристаллов. Под растущим давлением режущего клина происходит пластический сдвиг кристаллов. В момент сдвига давление клина на металл падает. Затем цикл стружкообразования повторяется. Для стали 45, по данным работы [1], в процессе стружкообразования количество пластически деформируемых кристаллов по отношению ко всему количеству сдвигаемых кристаллов равно 0,135. Такой периодически повторяющийся процесс подчиняется математическим законам колебательных процессов, а следовательно, частоты этих колебаний и их амплитуды могут быть определены с заданной степенью точности приборами [2].




**Изменение силы резания валика наплавленного металла при обычном холодном резании (верхняя кривая) и при резании с нагревом (нижние кривые):**
$L$ — длина окружности поперечного сечения валика

Наплавка валиков вдоль цилиндра с небольшими промежутками приводит к тому, что с момента начала резания возникают колебания, воспринимаемые приводом шпинделя и механизмом подачи. Разница в колебаниях силы резания почти постоянна на всей длине резания. Для холодного резания $\Delta F = F_{max} - F_{min} = 353{,}1$ Н. При резании с нагревом увеличивается частота колебаний, но снижается величина амплитуды, т. е. $\Delta F = F_{max} - F_{min} = 502 - 385 = 117$ Н. Измерение частоты колебания при стружкообразовании по ходу резания валика наплавленного металла дало следующие результаты.

1. Частота колебания совпадает с промежутками между пластическими сдвигами металла. Период колебаний зависит от массы сдвигаемого металла и величины прикладываемой силы сдвига.

2. Амплитуда колебаний возрастает с увеличением сил сопротивления сдвигу. При резании валика наплавленного металла амплитуда колебаний максимальна в момент приложения максимальной силы резания.

На практике наплавленный слой состоит из ряда валиков, наплавленных друг на друга с некоторым сдвигом. Допустим, что валики наплавлялись со сдвигом, равным $L/4$. При такой схеме наложения валиков металла получаем слой почти одинаковой толщины. Этот слой отличается тем, что он включает кроме основного наплавленного металла пленки, возникшие на границах раздела кристаллизации следующих наплавляемых валиков металла. Пленки отличаются от основного металла строением кристаллов и прочностными свойствами. Режущий инструмент при пересечении этих граничных пленок испытывает резкое увеличение сопротивления резанию, что ведет к изменению как частоты, так и амплитуды колебаний в процессе резания.

Из теории прочности известно, что поверхность, ограничивающая какую-либо массу тела, отличается по своим прочностным свойствам от глубинной массы металла [3]. Для металлов это объясняется наличием на границе раздела слоя мелкоизмельченных кристаллов, обладающих повышенными механическими свойствами. Кроме того, на границе сплавления кристаллов образуются усадочная рыхлота и пористость, поверхность которых содержит большое количество неметаллических включений, являющихся абразивом для режущего инструмента [4].

При резании нагретого до температур разупрочнения слоя наплавленного металла силы сопротивления резанию резко уменьшаются. Это обусловлено следующими причинами. Пленки на границах сплавления на-

| Номер п/п | Холодное резание | | | | Резание с нагревом | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $n$, об/мин | $S$, мм/об | $t$, мм | $P_z$, Н | $n$, об/мин | $S$, мм/об | $t$, мм | $T$, °С | $P_z$, Н |
| 1 | 200 | 0,28 | 0,5 | 1708 | 200 | 0,28 | 4,0<br>3,0<br>2,0<br>0,5 | 400<br>500<br>600<br>— | 688<br>610<br>548<br>107 |
| 2 | 315 | 0,28 | 0,5 | 1661 | 315 | 0,28 | 4,0<br>3,0<br>2,0<br>0,5 | 400<br>500<br>600<br>— | 565<br>508<br>446<br>93 |
| 3 | 500 | 0,28 | 0,5 | 1618 | 500 | 0,28 | 4,0<br>3,0<br>2,0<br>0,5 | 400<br>500<br>600<br>— | 550<br>500<br>421<br>82 |
| 4 | 800 | 0,28 | 0,5 | 1579 | 800 | 0,28 | 4,0<br>3,0<br>2,0<br>0,5 | 400<br>500<br>600<br>— | 538<br>486<br>416<br>69 |
| 5 | 1250 | 0,28 | 0,5 | 1544 | 1250 | 0,28 | 4,0<br>3,0<br>2,0<br>0,5 | 400<br>500<br>600<br>— | 522<br>464<br>408<br>58 |

плавленных валиков металла, разупрочнившись, не вызывают резкого увеличения амплитуды колебаний, поскольку неметаллические включения по границам кристаллизации металла потеряли первоначальную твердость и не являются препятствием резанию. В результате амплитуда колебаний, характеризующая пластический сдвиг металла при стружкообразовании, резко уменьшается. Это говорит о практически полном пластическом течении нагретого металла при стружкообразовании. Такой режим стружкообразования является характерным для резания с нагревом как обычных конструкционных сталей, так и трудно деформируемых. Отсюда следует важный вывод о том, что в процессе стружкообразования при резании с нагревом все напряженные кристаллы испытывают пластический сдвиг, а следовательно, стружка целиком состоит из кристаллов, претерпевших пластический сдвиг. Это объясняется тем, что у стали 45 при температурах выше 500 °С межатомные связи ослабевают и пластический сдвиг происходит при значительно меньших усилиях резания. Подтверждением данного факта служит резкое снижение усилия при резании с нагревом, зафиксированное динамометром (таблица).

Нагрев наплавленного металла проводили пламенем ацетилен-кислородной горелки. Распределение температур по глубине образца с зачеканенными термопарами было следующим: поверхность детали в зоне контакта с пламенем горелки нагревалась до температуры 1000 °С; на глубине в 1 мм от поверхности температура равнялась 800 °С; на глубине в 2 мм — 600 °С; на глубине в 3 мм — 500 °С, а на глубине в 4 мм — 400 °С. Такое распределение температуры по образцу позволило определить температуру срезаемого металла на заданной глубине резания.

В верхнем нагретом слое содержатся наиболее измельченные при затвердевании кристаллы, находится наибольшее количество шлаковых включений и газовых раковин. Это наиболее твердый слой, с трудом поддающийся обработке холодным резанием. Температура нагрева данного слоя, равная 950 ÷ 800 °С, достаточна для перевода кристаллов и неметаллических включений в пластическое состояние, что и обусловливает резкое снижение сил резания.

Экспериментальные данные были подтверждены при резании наплавленных поверхностей деталей при ремонте колесной техники. Резкое снижение усилия резания нагретого пламенем ацетилен-кислородной горелки наплавленного слоя металла позволило увеличить скорость обработки (частоту вращения шпинделя), глубину резания и величину подачи. В результате штучное время обработки наплавленной детали сократилось в 2 раза, что позволило резко поднять производительность труда на ремонтном предприятии.

Список литературы

1. **Плотников А. Л., Черемушников Н. П.** О неоднозначном влиянии прочностных свойств стали на составляющие силы резания // СТИН. 2006. № 10. С. 27—33.

2. **Прочность.** Устойчивость. Колебания: Справочник. В 3 т. // Под общ. ред. И. А. Биргера. М.: Машиностроение, 1968. Т. 1. 423 с.

3. **Костецкий Б. И.** Износостойкость деталей машин. М.: Машгиз, 1950. 216 с.

4. **Толстов И. В.** Справочник по наплавке. Ч. А. Челябинск: Металлургия, 1990. 381 с.

УДК 621.92-5

С. А. БАГИРОВ, канд. техн. наук (АзТУ, г. Баку)

# Особенности формирования геометрических параметров поверхностей при внутреннем шлифовании

Получены аналитические зависимости для определения рациональной исходной площади контакта в зависимости от конкретных условий внутреннего шлифования, что может способствовать уменьшению величины рабочего хода, устранению ударного воздействия в зонах входа и выхода круга, стабилизации процесса и повышению точности геометрической формы обработанной поверхности.

При внутреннем круглом шлифовании с продольной подачей, как и при других способах шлифования, резание в основном производится зернами, расположенными на фронтальном участке рабочей поверхности круга, определяемом величиной продольной подачи. Обработанный участок при последующих оборотах детали повторно встречается с рабочей поверхностью круга, что способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности. При каждой повторной встрече обработанного участка с рабочей поверхностью круга часть зерен попадает в полученные канавки, что приводит к их неравномерному нагружению по рабочей поверхности круга. Указанное явление приводит к неравномерному абразивному воздействию на обрабатываемую поверхность на протяжении всего контакта. Кроме того, в зонах входа шлифовального круга в контакт с поверхностью и выхода из него имеет место изменение площади контакта, о чем свидетельствуют погрешности формы в поперечном и продольном направлениях.

При обработке сквозных отверстий, чтобы исключить непрямолинейность образующей обработанной поверхности, рекомендуется предусмотреть перебег шлифовального круга в пределах от 1/3 до 1/2 его высоты [1]. Однако данная рекомендация не была обоснована ни физически, ни аналитически, чем и объясняется сумбурность качественных и количественных оценок величин перебега шлифовального круга и не связанность его с условиями и режимами проведения конкретной операции. При этом следует констатировать тот факт, что постоянный контакт определенной части рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью в некоторой степени способствует уменьшению перепада силы резания на участках входа и выхода круга из контакта.

Следовательно, более точное определение физической сущности процесса неравномерного абразивного воздействия на протяжении всего контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью и его аналитическое описание в зависимости от входных и выходных параметров процесса внутреннего шлифования актуальны. Наличие такого определения может способствовать оптимизации параметров процесса внутреннего шлифования на каждой конкретной операции.

Для объяснения процессов, происходящих в зонах входа и выхода, рабочую поверхность шлифовального круга до участка исходного контакта в зависимости от степени абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность условно разделим на отдельные полосы. Число полос определяется отношением $H/S_d$ высоты $H$ круга к продольной подаче $S_d$. При этом следует иметь в виду, что при каждой повторной встрече абразивного круга с уже обработанной поверхностью часть из числа абразивных зерен, находящихся в зоне резания, не используется, так как попадает на уже срезанные участки поверхности.

Влияние указанного эффекта на количество режущих зерен учитывается поправочным коэффициентом $q$. Следует иметь в виду, что в зоне как входа, так и выхода круга каждая полоса шириной, равной продольной подаче на оборот детали (в порядке нахождения от зоны резания), имеет повторные встречи с обрабатываемой поверхностью. При этом первая полоса в направлении продольной подачи является фронтальной и выполняет режущую функцию, а последующие полосы являются выхаживающими. Ширина последней полосы определяется величиной исходного контакта. Причем выхаживающие способности полос повышаются с увеличением числа их повторных встреч с уже обработанной поверхностью.

Проанализируем более детерминированно отдельные характерные моменты внутреннего шлифования с исходной площадью контакта. Длина рабочего хода при

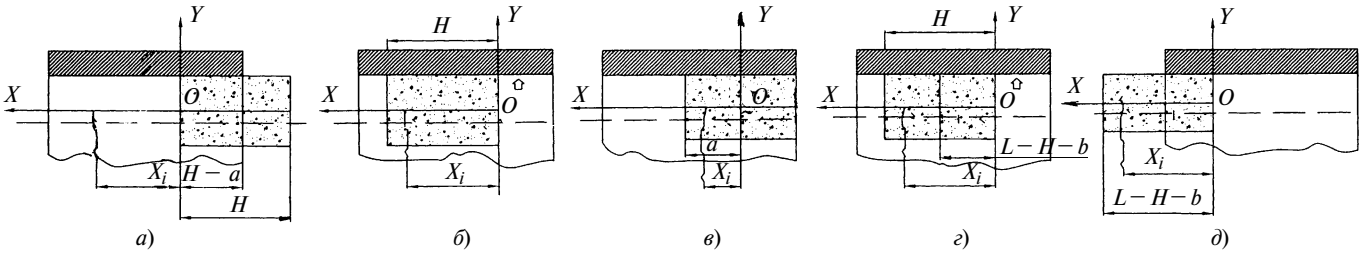



**Рис. 1. Схема шлифования с исходным контактом:**
*а* — участок исходного контакта; *б* — участок входа; *в* — участок отхода от исходного контакта; *г* — участок установившегося шлифования; *д* — участок выхода

шлифовании гладких отверстий по базовой схеме состоит из следующих участков (рис. 1):

$$L_р = l_{вх1} + l_{вх2} + l_{уст} + l_{вых}, \qquad (1)$$

где

$$l_{вх1} = a;\ l_{вх2} = H - a;\ l_{уст} = L - 2H + a;\ l_{вых} = a,$$

т. е. $L_р = L - H + 2a$. Здесь $l_{вх}$, $l_{вых}$, $l_{уст}$ — протяженности соответственно участков входа, выхода и установившегося шлифования, мм; $L$ — длина обрабатываемой поверхности, мм; $H$ — высота шлифовального круга, мм; $H - a$ — длина исходного контакта, мм.

Для определения границ каждого участка нарушения установившегося процесса шлифования схему расположим в прямоугольной системе координат с указанием характерных продольных перемещений шлифовального круга от начала координат. Эту координатную систему назовем базовой, поскольку она определяет относительное положение обрабатываемого отверстия и шлифовального круга в зависимости от продольной подачи (см. рис. 1).

Первый условный участок рабочего хода характеризуется полным входом шлифованного круга в контакт с обрабатываемой поверхностью. При этом площадь контакта увеличивается от площади исходного контакта до площади контакта по всей высоте круга. Характерным для этого участка является различное количество фактически работающих зерен в зоне исходного контакта и в зоне входа (см. рис. 1, *а*). На втором участке рабочего хода шлифовальный круг отходит от участка исходного контакта и процесс переходит в стадию установившегося шлифования (см. рис. 1, *б*). На третьем участке процесс стабилизируется, т. е. количество фактически работающих зерен становится постоянным (см. рис. 1, *в*). На четвертом участке происходит нарушение установившегося процесса с частичным выходом шлифовального круга из контакта. Перебег шлифовального круга прекращается тогда, когда площадь контакта станет равной площади исходного контакта (см. рис. 1, *г*).

Таким образом, закономерность изменения количества фактически работающих абразивных зерен по длине рабочего хода при шлифовании по схеме с исходным контактом выражается следующей системой уравнений:

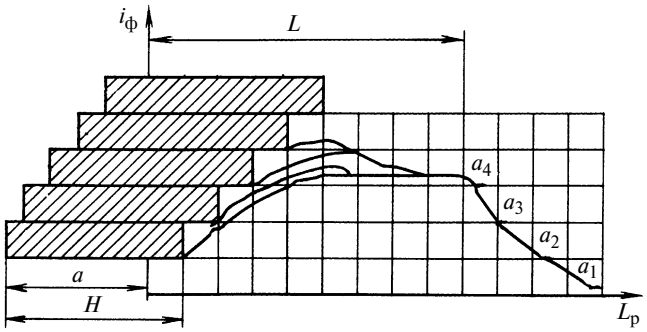



**Рис. 2. Изменения количества фактически работающих абразивных зерен по длине обработки при различных значениях исходного контакта:**
$a_1 = 4/5H$; $a_2 = 3/5H$; $a_3 = 2/5H$; $a_4 = 1/5H$

$$i_ф = \begin{cases} \pi Z_0 K 60 V_к D \dfrac{U}{V_д n_к}\left[\dfrac{\left(1 - q^{\frac{x_i n_д}{U}}\right)}{1-q} + q^{\frac{x_i n_д}{U}} \dfrac{n_д(H-a)}{U}\right], \\ 0 < X_1 \leqslant a; \\ \pi Z_0 K 60 V_к D \dfrac{U}{V_д n_к}\left[\dfrac{\left(1 - q^{\frac{x_i n_д}{U}}\right)}{1-q} + q^{\frac{x_i n_д}{U}} \dfrac{n_д(H n_д - X_1 n_д)}{U}\right], \\ a < x_1 \leqslant H; \\ \pi Z_0 K 60 V_к D \dfrac{U}{V_д n_к}\left[\dfrac{\left(1 - q^{\frac{H n_д}{U}}\right)}{1-q}\right],\ H < X_1 \leqslant (L + a - H); \\ \pi Z_0 K 60 V_к D \dfrac{U}{V_д n_к}\left[\dfrac{\left(1 - q^{\frac{(X_1 - L + b) n_д}{U}}\right)}{1-q}\left(1 - q^{\frac{(L - X_{1+a}) n_д}{U}}\right)\right], \\ (L - H + a) < X_1 \leqslant (L - H + 2a), \end{cases} \qquad (2)$$

где $Z_0$ — число зерен на 1 мм$^2$ рабочей поверхности круга; $K$ — относительный коэффициент, показывающий процент зерен, участвующих в работе; $V_к$ — скорость шлифовального круга, м/с; $D$ — диаметр шлифуемого отверстия, мм; $U$ — скорость продольного перемещения детали или круга, м/мин; $V_д$ — скорость вращения детали, м/мин; $n_к$ — частота вращения круга, об/мин; $n_д$ — частота вращения детали, об/мин; $q$ — коэффициент попадания режущих зерен на имеющиеся срезы при каждой повторной встрече.

Степень соответствия аналитической закономерности (2) характеру погрешностей формы по продольному сечению обработанного отверстия подтверждает адекватность полученной модели.

Графики (рис. 2), построенные на основании системы уравнений (2), показывают, что изменением величины исходной площади контакта можно управлять как величиной, так и характером изменения количества фактически работающих зерен на участках входа и выхода. Система уравнений (2) также обладает свойством варьирования через текущие значения продольной координаты $X_i$, что позволяет управлять количеством фактически работающих абразивных зерен при фиксированной исходной площади контакта. Таким образом, из условия стабильности количества фактически работающих абразивных зерен, изменяя любой из факторов, входящих в систему уравнений (2), по длине обработки, можно обеспечить равномерное абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность, способствующее повышению точности обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Акимов В., Иванов В. А.** Внутреннее шлифование. М.: Машиностроение, 1986. 125 с.
2. **Редько С. Г.** Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании // Станки и инструменты. 1960. № 12.

УДК 621.9.01

А. Л. ВОРОНЦОВ, Н. М. СУЛТАН-ЗАДЕ, А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, доктора технических наук (МГУПИ)

# Разработка новой теории резания*. 3. Современная теория разрушения при пластической деформации

Проблема разрушения издавна привлекала к себе внимание исследователей. В последние десятилетия в связи с интенсивным развитием реактивной авиации, ракетостроения, космической техники, высокоскоростного железнодорожного и автомобильного транспорта эта проблема приобрела исключительное практическое значение. Появились многочисленные исследования, посвященные анализу условий разрушения и методам расчета на прочность элементов конструкций, ответственных деталей машин и механизмов. Во многих работах рассматривается и разрушение металлов в процессах их технологической обработки, в частности, связанной с пластическим деформированием обрабатываемого материала.

Используя методы механики сплошной среды, можно найти поля напряжений и деформаций, а также распределение температуры в телах, находящихся под действием некоторой системы внешних сил. Однако, как отмечают многие исследователи, имеется разительное несоответствие между достаточно точными методами определения полей напряжений и деформаций и последующими, часто весьма грубыми, оценками прочности и возможности разрушения. К причинам этого следует отнести сложность структуры реальных материалов, наличие многочисленных повреждений, начиная от микроскопических и субмикроскопических дефектов и кончая крупными порами и магистральными трещинами. Существенное влияние на возможность разрушения оказывают внешние условия — характер нагрузок, а также агрессивность внешней среды. Поэтому разрушение — комплексная проблема, лежащая на стыке физики твердого тела, механики сплошной среды и материаловедения [8, 10, 16, 22—25, 30, 32].**

Прочность твердого тела обеспечивается силами притяжения между его частицами. Чтобы оторвать атомы друг от друга, необходимо преодолеть максимальную силу их взаимного притяжения. Теоретические расчеты показывают, что разрушение идеально твердого тела, представляющее собой отрыв атомных плоскостей, должно происходить при растягивающем напряжении $\sigma_p \approx 0{,}1E$, где $E$ — модуль упругости. Но на практике разрушение кристаллических тел происходит при гораздо меньших напряжениях $\sigma_p \approx 10^{-5}E$.

Таким образом, теоретическая и реальная прочности различаются в тысячи раз.

Физики предположили, что причина такого расхождения заключается в том, что в основе теоретического расчета лежит гипотеза о преодолении сил связи между атомами при отрыве одновременно по всему сечению испытуемого образца. В действительности же силы связи преодолеваются не одновременно. Причина этого — местные дефекты. Разрушение реальных кристаллов происходит не одновременно по всему сечению, а в две стадии, на первой из которых трещины возникают только в местах дефекта, а на второй — распространяются по всему сечению с разделением кристалла на две части.

Концентрация напряжений у концов трещин увеличивает местные напряжения и может приблизить их к напряжениям, соответствующим теоретической прочности. Однако, говоря о дефектах, определяющих реальную прочность, мы не имеем в виду трещины, заранее присутствовавшие в деталях, например имеющие металлургическую природу (раковины, усадочные трещины) или технологическое происхождение (сварочные, закалочные, ковочные трещины), а также трещины, которые могут появиться в результате работы машины. Такие трещины, несомненно, влияют на прочность, но они могут и совсем отсутствовать, что, однако, не приводит к повышению прочности материала до теоретического уровня.

Говоря о дефектах, определяющих реальную прочность, следует иметь в виду дефекты атомного строения, без которых реальных материалов не существует. Зарождение микротрещин при сравнительно низких значениях напряжений объясняется наличием дефектов кристаллической решетки, среди которых выделяют точечные (вакансии и межузельные атомы), линейные (дислокации), поверхностные (субмикротрещины), объемные (микропоры).

Главным из этих дефектов, снижающих теоретическую прочность металлических материалов до уровня реальной, является дислокация, которая обусловливает возможность пластической деформации кристаллических тел. Давно замечено, что даже в хрупких материалах появление трещин под нагрузкой инициируется пластическими сдвигами в объеме микроскопических участков (А. В. Степанов, 1937 г., опыты на разрыв образцов из каменной соли).

Но, несмотря на определенные успехи физического подхода к изучению условий пластического течения и разрушения твердых тел, до сих пор физическими методами не удается даже качественно описать

* Продолжение. Начало — см "Вестник машиностроения" № 1, № 2 (далее В. М. 1, В. М. 2) за 2008 г., продолжение — № 4 за 2008 г.

** Список литературы — см. В. М. 1, с. 67.

многие особенности процесса разрушения.

Количественную оценку прочности технических материалов и возможности разрушения в процессах их технологической обработки в настоящее время можно получить, используя лишь классический континуальный подход механики сплошной среды в рамках ее сравнительно нового раздела — ***механики разрушения,*** *целью которой является выяснение условий разрушения тел, находящихся под действием внешних нагрузок в определенном температурно-скоростном диапазоне.*

Развитие механики разрушения идет по следующим основным направлениям:

1) создание теорий предельных напряженных состояний материалов (теорий прочности);

2) разработка механики трещин;

3) создание феноменологических теорий накопления повреждений.

Как известно, в сопротивлении материалов и теории упругости *под* ***предельным напряженным состоянием*** *понимают такое состояние, при котором происходит возникновение остаточных деформаций у пластического материала или разрушение у хрупкого.* Поэтому первое направление механики разрушения мало пригодно для анализа условий разрушения металла при его обработке, связанной с развитыми пластическими деформациями, как, например, при обработке давлением или резанием. В связи с этим более подробно следует остановиться на механике трещин и теории накопления повреждений.

Существуют два принципиально разных вида разрушения.

***Отрывом*** *называется разрушение тела под действием нормальных растягивающих напряжений, при которых внешние силы превышают межатомные силы притяжения материала тела.* Отрыв характеризует *хрупкое* разрушение.

***Срезом*** *называется разрушение тела под действием касательных напряжений, вызывающих предельную деформацию сдвига слоев материала.* Срез характеризует пластическое или *вязкое* разрушение.

Классические теории прочности, опирающиеся на понятие предельного напряженного состояния, можно обобщить, предполагая существование некоторой функции главных напряжений $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ и постоянной $C > 0$, причем когда $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C$, достигается опасное состояние — материал разрушается, или начинается его пластическая деформация.

Однако на самом деле разрушение реального тела представляет собой процесс, начинающийся задолго до видимого разделения тела на части, а не происходящий мгновенно при достижении критического значения в соответствии с условием, приведенным выше. В реальном теле процесс разрушения начинается с изменений на микроскопическом и субмикроскопическом уровнях. В телах из разных материалов эти изменения могут иметь разный характер. Например, в металлах изменения микроструктуры, влекущие разрушение, тесно связаны с изменениями в процессе пластической деформации, т. е. необратимыми взаимными сдвигами слоев металла. В ходе этих сдвигов микроскопические дефекты группируются так, что сами сдвиги все более затрудняются, и в некоторых объемах сопротивление сдвигу становится сравнимым с сопротивлением отрыву (в начале оно значительно меньше последнего). Это приводит к появлению сети микропор и микротрещин, которые при дальнейшем нагружении объединяются в одну или несколько больших "магистральных" трещин, разделяющих тело на части.

В стеклах, горных породах и других достаточно хрупких материалах микротрещины обычно имеются уже в начальном состоянии, при нагружении их плотность по ряду причин быстро растет, и в результате скоро наступает макроразрушение. Но и здесь последнее предваряется изменениями на микроуровне.

Особенно отчетливо существенная роль таких изменений на микроуровне проявляется в циклических (или импульсных) процессах, когда внешняя нагрузка изменяется по периодическому закону. Опыт показывает, что вопреки классическим теориям прочности даже при максимальном напряжении цикла, значительно меньшем напряжения текучести, а тем более прочности, при осуществлении определенного числа циклов материал разрушается. Объяснить это явление можно, лишь допустив, что в каждом цикле нагружения в материале происходят необратимые изменения микроструктуры, накапливающиеся с ростом числа циклов.

Из приведенного выше видно, что для усовершенствования классических теорий прочности в них наряду с напряжениями нужно ввести и величины другого типа, в частности учитывающие накопление повреждений.

Введем в рассмотрение параметр повреждений

$$\omega = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)/C. \qquad (72)$$

Этот параметр может меняться от нулевого значения в начальном состоянии тела, когда никаких микроповреждений нет, до 1 при наивысшем возможном уровне микроповреждений, при котором возможно появление магистральных трещин, т. е.

$$0 \leqslant \omega \leqslant 1. \qquad (73)$$

Указанный параметр ввел в науку Ю. Н. Работнов, назвав его *поврежденностью.* В дальнейшем этот параметр при анализе условий разрушения в процессах обработки металлов давлением использовал также В. Л. Колмогоров, назвав его *степенью использования ресурса пластичности.*

Для того чтобы отразить тот факт, что разрушение представляет собой процесс, в условие разрушения должна входить не сама величина $\omega$, а скорость ее изменения:

$$d\omega/dt = F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \ldots), \qquad (74)$$

где $t$ — время, а многоточие подчеркивает тот факт, что $F$ — функция не одних только главных напряжений.

Конкретизация функции $F$ представляет собой очень сложную задачу. Поэтому часто отказываются от детального изучения возникновения и развития сети микротрещин и сводят задачу о разрушении тела к задаче равновесия тела с трещинами и определения сопротивления распространению в теле трещин заданной формы.

Решением последних задач занимается ***механика трещин,*** *целью которой является изучение условий, при которых происходит рост трещин с последующим разрушением тела.* Эта наука ведет свое начало от работ А. Гриффитса, выполненных в 1920-х годах. Для одного из видов стекла Гриффитс установил теоретическую прочность на растяжение, опреде-

ляемую напряжением в 11 200 МПа. Однако в результате его опытов на растяжение стеклянных стержней было получено лишь значение, равное 183 МПа.

Гриффитс первым выдвинул гипотезу о причинах расхождения между теоретическим сопротивлением отрыву, вычисляемым через силы взаимодействия между частицами в идеализированной атомной модели тела, и фактически наблюдаемыми его значениями, на несколько порядков меньшими теоретических. Гриффитс предположил, что реальные тела содержат микроскопические трещины уже в начальном состоянии (т. е. до первой деформации).

Для возможности создания математической теории (т. е. для вычислительных целей) Гриффитс ввел два допущения: одно — о форме трещин, другое — об их ориентации. Он принял, что эти трещины можно представить в виде полостей, имеющих форму сплюснутых эллипсоидов (рис. 31), большая ось которых перпендикулярна к направлению растягивающей силы. Вблизи точек *A* имеет место значительная концентрация напряжений, в результате чего напряжение в этих точках может в сотни раз превышать среднее напряжение по сечению. В результате и разрушение образца произойдет при относительно малом значении среднего напряжения, существенно меньшем теоретического сопротивления отрыву. Роль таких концентраторов напряжений могут играть и микронеоднородности поверхности тела.

Гриффитс также первым понял один важный факт, касающийся энергетических соотношений для тела с трещинами. Для пояснения

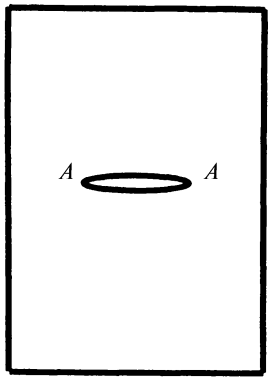



**Рис. 31. Исходная трещина эллиптической формы по Гриффитсу**

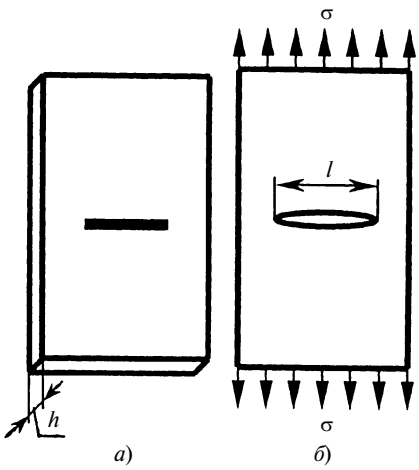



**Рис. 32. Образец с трещиной в виде тонкой щели (*а*), раскрывшейся (*б*) под действием напряжений σ**

рассмотрим образец в виде плоской пластины с трещиной, имеющей вид тонкой щели (рис. 32, *а*). Под действием на образец внешних сил "берега" трещины расходятся и получается полость (рис. 32, *б*), вблизи которой происходит разгрузка, и энергия уменьшается на величину $\Delta U$. С учетом этого упругая энергия тела с трещиной

$$U = U_0 - \Delta U, \qquad (75)$$

где $U_0$ — энергия тела без трещины.

Гриффитс предположил, что только часть работы раскрытия трещины превращается в упругую энергию разгрузки, а другая часть превращается в поверхностную энергию, связанную с образованием новых поверхностей при появлении и распространении трещины. Ранее понятие поверхностной энергии встречалось, например, в теории поверхностного натяжения при изучении капиллярных явлений, но в механике деформируемого твердого тела до Гриффитса оно не использовалось.

Поведение трещины в растянутой пластине Гриффитс рассматривал в зависимости от того, в какую сторону будет изменяться энергия пластины при увеличении длины трещины. Если с увеличением трещины энергия пластины будет уменьшаться, то трещина может расти без дополнительного внешнего воздействия, т. е. возможно ее нестабильное (самопроизвольное) распространение. Это условие аналогично второму закону термодинамики, согласно которому самопроизвольные процессы в системе совершаются в направлении, в котором свободная энергия системы уменьшается. Если система не изолирована от дополнительного действия внешних сил, на распространение трещины в общем случае будет оказывать влияние и работа этих сил. Однако вследствие больших скоростей движения трещин при хрупком разрушении работой внешних сил в большинстве случаев можно пренебречь. Кроме того, для страгивания трещины с места всегда требуется больше энергии (работы), чем для поддержания ее движения.

Напомним, что при простом растяжении образца без трещины плотность энергии деформации (удельная энергия деформации) с учетом закона Гука определяется выражением

$$u = \sigma\varepsilon/2 = \sigma^2/2E. \qquad (76)$$

Работа раскрытия трещины пропорциональна этой плотности и, кроме того, зависит от длины *l* трещины. Можно показать, что эта работа определяется выражением

$$A_{\text{р}} = \lambda^2 \frac{\sigma^2}{2E} l^2 h, \qquad (77)$$

где λ — безразмерный коэффициент пропорциональности, близкий к единице; *h* — толщина образца.

Как уже говорилось, по предположению Гриффитса только часть этой работы соответствует изменению упругой энергии, а остальная часть превращается в поверхностную энергию:

$$\Delta U = A_{\text{р}} - 2\gamma lh = \lambda^2 \frac{\sigma^2}{2E} l^2 h - 2\gamma lh, \qquad (78)$$

где γ — *плотность поверхностной энергии* (поверхностная энергия на единицу поверхности), т. е. работа, необходимая для преодоления силы взаимодействия соседних атомных слоев и образования единицы свободной поверхности.

Тогда с учетом выражения (75) энергия системы

$$U = U_0 - \lambda^2 \frac{\sigma^2}{2E} l^2 h + 2\gamma lh. \qquad (79)$$

Рассмотрим малые изменения длины трещины при фиксированных внешних силах, действующих на тело. Учитывая, что $U_0$, λ, σ, *E*, *h*

не зависят от $l$, из формулы (79) имеем

$$\frac{\partial U}{\partial l} = \left(-\lambda^2 \frac{\sigma^2}{E} l + 2\gamma\right) h. \qquad (80)$$

В поведении трещины возможны три случая:

1) $\partial U/\partial l < 0$ — трещина неустойчива, легко возникает ее самопроизвольное распространение;

2) $\partial U/\partial l > 0$ — трещина устойчива, без дополнительной нагрузки не растет;

3) $\partial U/\partial l = 0$ — критическое состояние.

Из последнего условия с учетом формулы (80) находим *критическое напряжение* от внешних сил, при достижении которого возможно самопроизвольное и быстрое (катастрофическое) распространение трещины по всему поперечному сечению тела:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{2E\gamma}{l}}. \qquad (81)$$

Можно поставить и обратную задачу: найти *критическую длину трещины,* т. е. длину, при которой для заданной нагрузки трещина будет самопроизвольно увеличиваться. В этом случае из формулы (81) получаем:

$$l_{\text{кр}} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{2E\gamma}{\sigma^2}. \qquad (82)$$

Такова в общих чертах теория Гриффитса, положившая начало современной механике трещин. Обобщение этой теории для случая, когда тело содержит несколько трещин, связано с большими затруднениями. Спорный вопрос о возникновении бесконечно большого напряжения по концам трещины в теории Гриффитса (как пишет Дж. Гордон [8], "математика, использованная Гриффитсом, не внушает особого доверия") был сглажен в 1961 г. Г. И. Баренблаттом, который условно ввел вместо него большое, но конечное напряжение, представляющее атомные силы сцепления.

Теория Гриффитса подвергалась экспериментальной проверке и дала более или менее удовлетворительные результаты применительно к стеклу и кварцу — твердым материалам, не обнаруживающим заметных пластических свойств. Для других материалов теория Гриффитса дает очень большую погрешность по сравнению с результатами опытов.

Следует отметить, что после работ Гриффитса энергетический подход к анализу разрушения получил большую популярность. Но существенным недостатком энергетической теории Гриффитса и его последователей является то, что она не учитывает влияния на разрушение пластической деформации.

В приведенной выше задаче Гриффитс рассматривал материал как идеально хрупкий и предполагал, что затраты энергии связаны только с поверхностной энергией твердого тела, имеющей ту же физическую природу, что и у жидкости. Однако исследования Орована и Ирвина показали, что затраты энергии на создание новых поверхностей при развитии трещины связаны главным образом с работой пластической деформации объемов материала, расположенных перед фронтом трещины. У большинства реальных материалов из-за больших напряжений в малой области конца трещины возникает зона пластического течения, в которой распределение напряжений и смещений отлично от упругого. В результате при распространении трещины имеет место значительная пластическая деформация, которая намного увеличивает работу распространения трещины или, как принято говорить, *вязкость разрушения.* В связи с этим Орован предложил унифицировать формулу Гриффитса (81), добавив к поверхностной энергии работу пластической деформации у вершины движущейся трещины. Однако в ходе экспериментальной проверки [22] были обнаружены существенные недостатки полученной в результате такого улучшения формулы Гриффитса—Орована.

Значительную сложность применения энергетических теорий, не связанных с детальным анализом напряженного состояния и накопленных деформаций, обусловливает и сильное влияние на разрушение вида напряженного состояния. Изменяя напряженное состояние тела, можно вызвать переход его материала из пластичного состояния в хрупкое и наоборот.

Чтобы понять, как это происходит, напомним, что хрупкое разрушение и пластическая деформация вызываются разными напряжениями: первое — нормальными, а вторая — касательными. Соотношение абсолютных значений нормальных и касательных напряжений при нагружении тела зависит от напряженного состояния и может меняться. Так, например, при одноосном растяжении

$$\tau_{\max} = \sigma_1/2, \qquad (83)$$

т. е. максимальные касательные напряжения в 2 раза меньше, чем нормальные. При кручении

$$\tau_{\max} = \sigma_1, \qquad (84)$$

т. е. нормальные и касательные напряжения одинаковы. Меняя напряженное состояние и, следовательно, отношение $\tau_{\max}/\sigma_1$, можно изменять и характер разрушения материала при неизменных численных значениях предела текучести $\tau_s$ при сдвиге и напряжения отрыва (называемого также сопротивлением отрыву) $\sigma_{\text{отр}}$: в одном случае $\tau_{\max}$ достигнет уровня $\tau_s$ раньше, чем $\sigma_1$ поднимется до уровня $\sigma_{\text{отр}}$, и в материале возникнет пластическая деформация; в другом случае $\sigma_1$ поднимется до уровня $\sigma_{\text{отр}}$ раньше, чем $\tau_{\max}$ достигнет уровня $\tau_s$, и произойдет хрупкое разрушение.

Рассмотрим пример с инструментальной сталью, имеющей предел текучести при сдвиге $\tau_s = 900$ МПа и напряжение отрыва $\sigma_{\text{отр}} = 1600$ МПа. Когда при одноосном растяжении нормальное напряжение $\sigma_1$ достигнет уровня 1600 МПа, произойдет хрупкое разрушение, но пластическая деформация еще не начнется, поскольку в соответствии с формулой (83) $\tau_{\max} = 800$ МПа, что меньше $\tau_s = 900$ МПа. А когда при кручении касательное напряжение $\tau_{\max}$ поднимется до уровня 900 МПа, начнется пластическая деформация, но разрушения не произойдет, поскольку в соответствии с формулой (84) $\sigma_1 = 900$ МПа, что меньше $\sigma_{\text{отр}} = 1600$ МПа.

В данном примере рассмотрены крайние случаи хрупкого и пластичного поведения материала. Возможен, однако, и промежуточный вариант, когда в образце начинается пластическая деформация, но в результате деформационного упрочнения (наклепа), определяемого вели-

чиной накопленной деформации, напряжение $\sigma_1$ достигнет уровня $\sigma_{отр}$ уже в процессе пластической деформации. Хрупкое разрушение в этом случае произойдет после протекания некоторой пластической деформации (что характерно для большинства процессов обработки металлов давлением и обработки резанием).

Несмотря на указанные существенные недостатки энергетического подхода к проблеме разрушения, современные работы по теории резания опираются именно на основные представления теории Гриффитса, но в значительно более примитивной форме. Также используется понятие поверхностной энергии, а возможность разрушения оценивается путем сопоставления подводимой к обрабатываемой заготовке энергии с условной энергией разрушения. Никакой детальный анализ напряженного, а тем более деформированного состояния при этом не проводится.

Между тем одну и ту же энергию деформации можно подвести к заготовке при совершенно разных напряженных состояниях. Например, если заготовку из свинца подвергнуть линейному растяжению, то она обязательно разорвется при определенном значении деформации. При этом можно подсчитать работу (т. е. энергию), затраченную на весь ход растяжения. Затем другую заготовку из свинца можно подвергнуть сжатию до достижения того же количества затраченной энергии. При этом никакого разрушения не наступит. Продолжая опыт, можно расплющить заготовку из свинца в очень тонкий диск (рис. 33), на боковой поверхности которого возникнут еле заметные трещины, но разделения на части так и не произойдет. При этом подведенная энергия будет в десятки раз превышать энергию, необходимую для разрушения того же материала при растяжении. Аналогичные результаты можно получить и при испытаниях других материалов, например заготовок из алюминиевых сплавов (рис. 34).

Но для определения энергии разрушения с целью последующего применения при анализе процессов резания используют площадь диаграммы растяжения образца до его разрыва, в то время как процессы

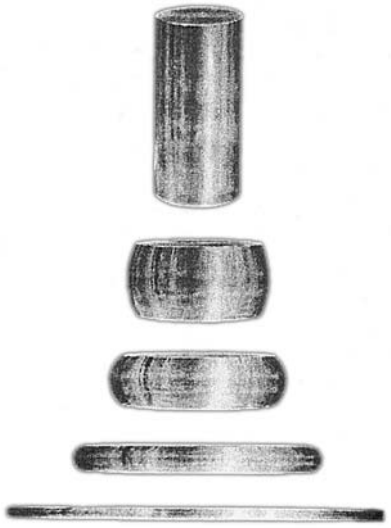


**Рис. 33. Изменение размеров (мм) цилиндрической заготовки из свинца СОО при последовательном сжатии (опыты А. Л. Воронцова):**
$d_0 = 20$; $h_0 = 40$; $h_1 = 16{,}4$; $h_2 = 10{,}8$; $h_3 = 5{,}6$; $h_4 = 2{,}3$

резания характеризуются преимущественными напряжениями сжатия, а не растяжения.

Кроме того, на возможность разрушения сильнейшее влияние оказывает величина гидростатического давления, никак не учитываемая в современных теориях механической обработки, использующих энергетические концепции, не связанные с детальным определением напряженного состояния.

***Относительным гидростатическим давлением*** *будем называть отношение среднего нормального напряжения к интенсивности напряжений:*

$$p = \sigma/\sigma_i, \qquad (85)$$

где интенсивность напряжений в общем случае определяется формулой

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+} \rightarrow$$
$$\rightarrow \overline{+\ (\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)}. \qquad (86)$$

Так как по условию пластичности

$$\sigma_i = \sigma_s, \qquad (87)$$

то при наличии пластических деформаций относительное гидростатическое давление можно представить в более простой форме:

$$p = \sigma/\sigma_s. \qquad (88)$$

Опыт показывает, что все твердые тела становятся тем более пластичными и устойчивыми к разрушению, чем меньше алгебраическая величина относительного гидростатического давления. При отрицательных значениях относительного гидростатического давления, соизмеримых с $-1$, все твердые тела приобретают способность значительно изменять свою форму без всяких видимых нарушений сплошности строения [25]. Принято говорить, что при этих условиях твердые материалы "текут как жидкости" (например, известное течение гранитных пород на больших глубинах земной коры).

Классические опыты П. Бриджмена показали, что при приближенно постоянном значении вида напряженного состояния и отрицательном гидростатическом давлении, изменявшемся в экспериментах в широких пределах, значение деформации разрушения $e_р$ также существенно изменялось. Для примера приведем некоторые данные [25].

Для одной из испытуемых сталей при простом растяжении при атмосферном давлении было получено

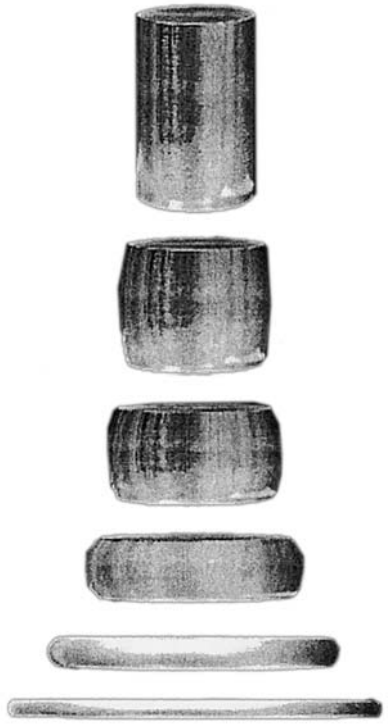


**Рис. 34. Изменение размеров (мм) цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава АДО (опыты А. Л. Воронцова):**
$d_0 = 20$; $h_0 = 30$; $h_1 = 20{,}3$; $h_2 = 15{,}1$; $h_3 = 9{,}8$; $h_4 = 5{,}2$; $h_5 = 3{,}1$

значение $e_p = 0{,}91$. Для той же стали при приложении гидростатического давления $\sigma = -280$ МПа деформация разрушения $e_p$ стала равной уже 1,35. Далее было зафиксировано: при $\sigma = -980$ МПа — $e_p = 3{,}01$, а при $\sigma = -1320$ МПа — $e_p = 3{,}55$. При этом во всех случаях вид напряженного состояния, характеризуемый параметром Надаи—Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \qquad (89)$$

остался одним и тем же — простым растяжением с $\mu_\sigma = -1$. Между тем деформация разрушения увеличилась почти в 4 раза. При еще большем снижении алгебраической величины гидростатического давления Бриджмен достиг увеличения деформации разрушения в 20 раз [16].

Этот пример показывает, какое большое влияние может оказывать гидростатическое давление на величину деформации разрушения (характеризующую предельную пластичность) при практически одном и том же виде напряженного состояния.

Б. И. Береснев с соавторами исследовали влияние гидростатического давления на "залечивание" пор и трещин [24]. Для этого были получены специальные образцы из меди, насыщенные порами и трещинами. Растяжение этих образцов под сжимающим гидростатическим давлением резко повысило их пластичность. При давлении 400 МПа предельная пластичность образцов с дефектами достигла уровня пластичности бездефектного металла.

Такие же образцы были подвергнуты выдавливанию (напряженное состояние сжатия) и волочению (напряженное состояние преимущественного растяжения). При выдавливании в образцах происходило "залечивание" пор и трещин: механические свойства меди, продеформированной на 40 %, совпали с механическими свойствами деформированной бездефектной меди. После волочения поры и трещины в образцах сохранились.

С учетом изложенного на ряде примеров можно показать определенную научную несостоятельность энергетических теорий разрушения при механической обработке.

Допустим, что при точении заготовки в обычных условиях с подачей смазочно-охлаждающей жидкости получается стружка надлома, т. е., в соответствии с энергетической концепцией, подводимая к заготовке энергия равна энергии разрушения обрабатываемого материала. Но если представить, что тот же станок опущен на дно океана и точение производится в жидкости, не только выполняющей смазочно-охлаждающую функцию, но и создающей большое давление на заготовку, то стружка уже станет сливной (опыты Бриджмена). Между тем в последнем случае подводимая к заготовке энергия еще больше увеличилась, так как к заготовке дополнительно подводится энергия сжатия (если убрать давление жидкости, то заготовка, расширяясь, может совершать работу). А разрушение не только не усилилось, но, наоборот, совсем прекратилось.

Приведем другой пример. Для того чтобы из сливной стружки получить стружку надлома, на резце на некотором расстоянии от его режущей кромки выполняют стружколом. При этом эксперименты показывают, что при наличии стружколома сила резания и, соответственно, подводимая к заготовке энергия уменьшаются [7, с. 103, 146]; трещинообразование и разрушение, наоборот, усиливаются, что никак нельзя объяснить с энергетических позиций. Поэтому энергетическая теория не позволяет создать математически обоснованную теорию проектирования стружколомов. Научно обоснованная теория работы стружколома будет изложена нами с принципиально новых позиций в следующей статье.

Недостатки практического применения механики трещин и энергетических теорий разрушения делают наиболее целесообразным использование ***теории накопления повреждений,*** *целью которой является феноменологическое описание процессов разрушения различной природы.* Теория накопления повреждений способна описать вызванные ползучестью внезапные квазихрупкие разрушения элементов конструкций при очень малых деформациях (менее 1 %) после длительного периода нормальной работы, усталостные разрушения, вызванные действием переменных нагрузок, а также разрушения, возникающие при развитой пластической деформации в процессах обработки металлов.

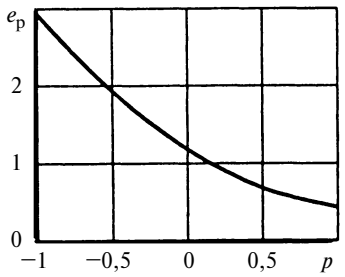



**Рис. 35. Диаграмма пластичности стали 20 при температуре 20 °С [3]**

Введем понятие жесткости напряженного состояния: ***жестким*** *называется напряженное состояние, затрудняющее возникновение пластической деформации и облегчающее хрупкое разрушение отрыва.* Чем жестче напряженное состояние, тем больше опасность хрупкого разрушения.

Эксперименты П. Бриджмена, работы Г. А. Смирнова-Аляева [25] и В. Л. Колмогорова [16, 24] в качестве основного показателя жесткости напряженного состояния позволяют принять относительное гидростатическое давление.

Опыты, проведенные рядом ученых по растяжению, сжатию и кручению цилиндрических образцов, в том числе в условиях всестороннего сжатия гидростатическим давлением, свидетельствуют о том, что при заданных температуре и скорости деформации в условиях монотонной деформации имеется близкая к однозначной зависимость между пластичностью металла, которая характеризуется накопленной деформацией, соответствующей моменту разрушения, и показателем жесткости напряженного состояния. Эту зависимость можно представить в виде *диаграммы пластичности* (*кривой разрушения*), имеющей вид, показанный на рис. 35.

При использовании диаграмм пластичности, приведенных в работе [16] и построенных в эквивалентных координатах "$\Lambda_p - \sigma/T$" (где $T$ — интенсивность касательных напряжений), делаем перевод их значений в принятые нами по формулам:

$$e_p = 0{,}577\Lambda_p;\ p = 0{,}577(\sigma/T). \qquad (90)$$

Из анализа диаграммы на рис. 35 следует, что пластичность наиболее высока в условиях всестороннего гидростатического сжатия и резко падает с ростом алгебраической ве-

личины относительного гидростатического давления $p$.

Таким образом, область отрицательных значений гидростатического давления относится к мягким схемам напряженного состояния, а область положительных значений — к жестким схемам.

Теорию накопления повреждений при анализе разрушения металлов в условиях немонотонной пластической деформации впервые применил В. Л. Колмогоров, который ограничился одним основным параметром — относительным гидростатическим давлением $p$. Предложенное им кинетическое уравнение для поврежденности можно записать в виде

$$d\omega = de_i/e_{\text{р}}(p). \qquad (91)$$

С учетом выражения (1) это уравнение также можно представить в виде

$$d\omega = \xi_i dt/e_{\text{р}}(p). \qquad (92)$$

На основании этих уравнений условие разрушения В. Л. Колмогорова можно записать в виде:

$$\omega_{\text{р}} = \int_0^{e_i} \frac{de_i}{e_{\text{р}}[p(e_i)]} = \int_0^{t} \frac{\xi_i dt}{e_{\text{р}}[p(t)]} = 1. \qquad (93)$$

Физический смысл этого выражения заключается в достижении величиной поврежденности $\omega$ в момент времени $t = t_{\text{р}}$ критического значения $\omega_{\text{р}} = 1$, при котором происходит образование трещины гриффитсового размера и наступает стадия катастрофического разрушения.

Укажем, что по форме записи и смыслу условие В. Л. Колмогорова совпадает с известным до него в академической механике условием разрушения — интегралом Бейли, полученным из принципа линейного суммирования повреждений [9].

Для того чтобы по условию В. Л. Колмогорова рассчитать степени использования запаса пластичности материала и определить возможность его разрушения при том или ином процессе обработки, необходимо последовательно решить ряд задач. Прежде всего следует полностью определить напряженное и деформированное состояния обрабатываемого материала. Для этого необходимо определить траектории движения частиц материала в очаге пластической деформации, а также значения интенсивности скоростей деформации и относительного гидростатического давления вдоль этих траекторий.

Вторая задача связана с определением пластичности материала в зависимости от различных термомеханических параметров. Методика исследования и данные о пластичности сталей и сплавов различных марок в зависимости от схемы напряженного состояния, температурно-скоростных условий и немонотонности деформации достаточно подробно изложены в монографии [16].

Результаты исследования пластичности выражаются в виде диаграмм пластичности, а в некоторых случаях с достаточной для практики точностью [24] могут быть представлены параметрическими зависимостями типа

$$e_{\text{р}} = f(p, \xi_i, t^\circ, \mu_\sigma, \alpha). \qquad (94)$$

где $\alpha$ — некоторый показатель немонотонности.

Если известны напряженное и деформированное состояния вдоль траектории движения частиц деформируемого материала, а также зависимость (94), то с помощью выражения

$$\omega = \int_0^{t} \frac{\xi_i dt}{e_{\text{р}}} \qquad (95)$$

можно определить степень использования запаса пластичности. Анализ результатов такого расчета позволяет сделать вывод о возможности разрушения материала при данном процессе его обработки и определить в заготовке области наибольшей вероятности трещинообразования.

В. Л. Колмогоров в работе [16, с. 29] декларативно утверждает, что "в настоящее время определение напряжений в объеме не более трудоемко, чем подсчет удельного давления". Аналогичное высказывание об определении напряженного и деформированного состояния обрабатываемого материала имеется и в книге [24, с. 46].

Такие высказывания вызывают у читателей обманчивое ощущение простоты аналитического определения компонентов тензора напряжений и накопленных деформаций. Но более сотни теоретических исследований различных процессов пластической деформации, представленных в трехтомнике [3—5], показывают, что достаточно строгое определение указанных величин представляет большую математическую сложность.

Несмотря на декларацию о простоте, авторы работ [16, 24] не смогли привести ни одного собственного решения задачи по теоретическому определению напряженного и деформированного состояний обрабатываемого материала. Хотя в книгах [16, 24] и приведено академическое выражение накопленных деформаций по А. А. Ильюшину (1), но оно использовано лишь для украшения книги и не интегрируется с применением координат Лагранжа (как это корректно сделано для разных процессов в трехтомнике [3—5]), а заменяется банальным суммированием деформаций ячеек экспериментальной делительной сетки с допущением, что их считают малыми, и дополнительным допущением, что их считают не только малыми, но и монотонными.

Для замены строгого интегрирования выражений (93), (95) элементарным суммированием в работах [15, 16, 24] приводятся различные упрощенные формулы. Например, в справочнике [15] рекомендуется разбивать рассматриваемый процесс пластической деформации на расчетные этапы и определять степень использования запаса пластичности по формуле

$$\omega = \sum_{i=1}^{n} (\Delta e_i/e_{\text{р}})^{\alpha_i}, \qquad (96)$$

где $n$ — число расчетных этапов; $\Delta e_i$ — приращение накопленной деформации за каждый расчетный этап; $e_{\text{р}}$ — деформация разрушения при относительном гидростатическом давлении, соответствующем рассматриваемому этапу; $\alpha_i$ — показатель материала.

Но в большинстве процессов обработки металлов гидростатическое давление при движении частицы материала в очаге пластической деформации непрерывно меняется [3—5],

а в справочнике [15] не указано, как выбирать приращения $\Delta e_i$ накопленных деформаций, на протяжении которых относительное гидростатическое давление можно считать постоянным. Между тем это важно, поскольку зависимость степени использования запаса пластичности $\omega$ от приращения накопленной деформации является нелинейной, т. е. результат будет существенно зависеть от величины расчетных отрезков. Выбрав разный шаг расчета $\Delta e_i$ мы получим совершенно разные результаты. Следовательно, методика из справочника [15] не является объективной.

Приведем поясняющий математический пример. Допустим, что накопленная деформация $e_i$ изменяется от 0 до 2. Сначала рассмотрим линейную зависимость. По аналогии с формулой (96) условно примем, что $\alpha_i = 1$ и $\omega = \Sigma a \Delta e_i$, где $a$ — некоторый коэффициент. Выбрав шаг расчета $\Delta e_i = 1$, получим $\omega = a(1 + 1) = 2a$. Изменив шаг расчета, допустим, на 0,5, получим $\omega = a(0{,}5 + 0{,}5 + 0{,}5 + 0{,}5) = 2a$, т. е. такое же, как было. Таким образом, при линейной зависимости конечный результат не будет зависеть от выбранного шага расчета. Теперь положим, что зависимость — не линейная ($\alpha_i \neq 1$), например параболическая: $\omega = \Sigma a(\Delta e_i)^2$. В этом случае при шаге 1 получим $\omega = 2a$, а при шаге 0,5 — $\omega = a(0{,}25 + 0{,}25 + 0{,}25 + 0{,}25) = a$, т. е. существенно (в 2 раза) отличную величину. При шаге расчета 0,25 получим $\omega = 0{,}5a$, т. е. значения $\omega$ различаются уже в 4 раза.

Таким образом, если при расчете деформации в процессе обработки одинаковых изделий один технолог выберет шаг расчета, равный 1, другой — равный 0,5, а третий — 0,25, то они получат значительно отличающиеся друг от друга оценки возможности разрушения заготовки.

Следует также отметить, что приводимые в литературных источниках диаграммы пластичности построены по значениям накопленных деформаций и относительного гидростатического давления в момент разрушения [16, с. 48]. Суммирование повреждений при этом не проводилось. Поэтому при использовании данных диаграмм в практических расчетах представляется нецелесообразным применять такое суммирование, так как получаемый результат будет принципиально неточным. Например, если мы попробуем определить деформацию разрушения при сжатии образца из материала, диаграмма пластичности которого известна, то при использовании суммирования в силу упомянутой выше нелинейности не получим результата, одинакового с экспериментальным, отраженным соответствующей точкой на диаграмме пластичности и полученным при точно таком же сжатии по значениям накопленных деформаций и гидростатического давления в момент разрушения. Очевидно, что метод расчета и метод построения исходной диаграммы пластичности должны быть одинаковыми.

Кроме того, сложность практического применения теоретической методики прогнозирования разрушения должна быть намного меньше сложности прямой экспериментальной проверки возможности образования трещин. Отсюда следует целесообразность максимального упрощения методики теоретического расчета разрушения. Для этого А. Л. Воронцов в монографии [2] предложил не разбивать общую деформацию на расчетные этапы (что избавляет пользователя от проблемы выбора корректной величины шага расчета), а использовать среднюю за весь процесс величину относительного гидростатического давления в опасной точке и по этой величине определять с помощью диаграммы пластичности деформацию разрушения $e_р$. Деформацию $e_{iA}$, накопленную за весь процесс в опасной точке $A$, следует рассчитывать по формуле, полученной с помощью соответствующего теоретического решения, общая методика которого будет подробно изложена в статье 6 данного цикла. Если окажется, что $e_{iA} \geqslant e_р$, то следует сделать вывод, что произойдет разрушение.

Теоретический метод прогнозирования разрушения, предложенный А. Л. Воронцовым, прошел широкую экспериментальную проверку применительно к разнообразным процессам пластической деформации [3—5] и во всех случаях показал достаточные практические точность и надежность (важно отметить, что для сопоставления использовались не только экспериментальные данные автора метода, но и все известные данные независимых исследователей).

В заключение следует рассмотреть высказывание А. М. Вульфа [7, с. 16]: "Нельзя согласиться с утверждением возможности разрушения лишь после завершения пластической деформации при полном использовании ресурса пластичности. Основным оказывается механизм образования микротрещин в карбидных частицах, действующих в ферритной матрице как мощный концентратор напряжений, способный создавать зародыши разрушения уже при 1 % деформации".

В первой из приведенных фраз А. М. Вульф пользуется понятием механики сплошной среды, а во второй — противопоставляет ему физико-материаловедческие явления, которые протекают в реальной дискретной среде. При этом автор книги [7], очевидно, не знает, что понятие "ресурс пластичности" принадлежит теории накопления повреждений. Эта теория (как было изложено нами выше) никоим образом не отрицает образования микротрещин и зародышей разрушения задолго до окончательного макроразрушения, характеризуемого исчерпанием ресурса пластичности. Последнее понятие лишь феноменологически суммирует результат постепенного накопления микроповреждений. Это позволяет поставить расчет возможности разрушения на прочную математическую основу. А физические и материаловедческие представления о разрушении по настоящее время остаются лишь набором словесных рассуждений без какого-либо математического аппарата, пригодного для эффективного практического применения. Рассуждая о ферритах, карбидах и зародышах разрушения, невозможно дать технологу конкретный ответ, на каком расстоянии от зоны резания и какой величины следует сделать стружколом для обеспечения гарантированного дробления стружки.

УДК 658.56

М. Ю. ТЕВЕЛЕВ (МГУ)

# Основы организационно-экономического управления качеством на машиностроительном предприятии

В 2006 г. проблема вступления России во Всемирную торговую организацию (ВТО) была одной из главных тем обсуждения российскими экономистами. Предполагается, что вступление России в ВТО должно обеспечить стране дополнительные 2 % прироста годового внутреннего валового продукта (ВВП) и 10 %-е увеличение объема инвестиций.

По идейному замыслу вступление России в ВТО должно иметь больше положительных последствий, чем отрицательных. Однако снижение таможенных пошлин одновременно с принятием ряда поправок в законодательство повлечет за собой увеличение массы импортных товаров на российском рынке, вследствие чего существенно возрастет конкуренция, достойно противостоять которой смогут только качественные отечественные товары.

Участие в ВТО должно уменьшить основной минус и главную негативную особенность российской экономики — сырьевую ориентацию и низкий уровень конкуренции. Оно призвано побудить отечественных предпринимателей интенсивнее использовать прогрессивные технологии для достижения уровня качества продукции, присущего ведущим мировым конкурентам на соответствующих сегментах рынка, что даст толчок развитию многих секторов экономики России.

Но ситуация для российских фирм осложняется тем, что для соответствующих преобразований практически не осталось времени. При этом следует иметь в виду, что активный процесс глобализации нередко сопровождается размещением ведущими мировыми производителями своих производств в странах с более дешевой рабочей силой.

Так, японская автомобилестроительная компания Toyota в настоящее время строит в Санкт-Петербурге завод (срок сдачи 2008 г.) по выпуску легковых автомобилей — малолитражек Corolla и машин среднего класса Camry, всего около 15 тыс. в год. В Иркутской области ведутся переговоры с китайскими и малазийскими компаниями о строительстве заводов по глубокой переработке древесины в регионе. В Нижнеилимске в 2004 г. открылся совместный российско-японский лесоперерабатывающий завод. По словам губернатора Иркутской области, с запуском этого завода начинается переход к современным технологиям освоения лесных ресурсов. Губернатор отметил, что подобные совместные предприятия в других районах будут организованы на аналогичных условиях инвестирования.

В 2006 г. в Липецке руководство компании Indesit приняло решение о расширении производственных мощностей на местном заводе бытовой техники. На эти цели, а также на организацию производства новых изделий планируется в ближайшие три года выделить инвестиций на сумму более 40 млн евро. Растет интерес итальянских предпринимателей к участию в особой экономической зоне "Липецк".

В Сибири за один год на базе существующего и успешно развивающегося совместного российско-японского предприятия "Игирма-Гайрику" создан российско-японский завод "СибэкспортлесТайрику" на условиях 50 %-х долей российских и японских учредителей. Примерно 40 % пиломатериалов пойдет на экспорт.

И подобных примеров немало.

Представляется, что участившиеся случаи конверсии оборонных предприятий, банкротства или перепродажи отечественных производственных площадок, создания аутсорсинговых заводов и совместных предприятий с преимущественной долей иностранной собственности означают отход от роли "сырьевого придатка" и символизируют начало процесса превращения российской промышленности в производственную площадку ведущих мировых производителей.

Описываемый процесс имеет свои плюсы и минусы, обсуждать которые можно очень долго. Однако в данной статье не ставится цель проанализировать все положительные и отрицательные экономические, политические и социальные стороны процесса иностранного инвестирования в российскую промышленность. Далее будут рассмотрены основные причины, вследствие которых отечественная промышленность все больше и больше уступает позиции зарубежным производителям, и возможные пути выхода из этой ситуации.

Одна из основных причин того, что российская промышленность становится производственной площадкой ведущих мировых компаний, — это неэффективное использование уже накопленного отечественного потенциала в образовании и науке, подготовке кадров, уровне профессиональной квалификации.

Низкий уровень финансовой грамотности и маркетинговая близорукость российских собственников нередко приводят к тому, что они готовы продавать свои

производства исключительно как суммарную стоимость активов. При возникновении любых трудностей, обусловленных конкуренцией, в случае снижения объемов продаж, увеличения дебиторской и кредиторской задолженностей, изменения структуры спроса, приводящего к необходимости вносить коррективы в производственную программу, закупать дополнительное или высокотехнологичное оборудование, собственники готовы принять наиболее легкое решение.

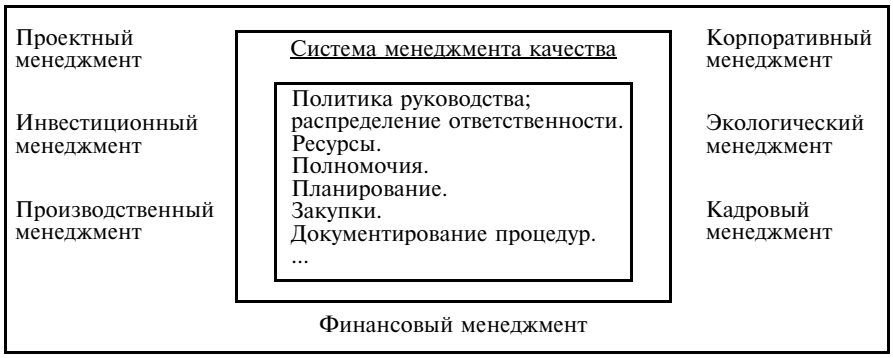



**Рис. 1. Система управления качеством**

Но современные российские руководители все чаще начинают осознавать истинный смысл понятия "рыночная экономика". Обретают практический смысл заученные еще со студенческой скамьи ее признаки: информационная прозрачность, невысокие барьеры по входу и выходу, множественность покупателей и продавцов, равный доступ к источникам сырья и другим ресурсам.

И в этих условиях ряд отечественных предприятий уже может составить серьезную конкуренцию западным производителям.

Что же является основным фактором, определяющим успех на рынке? Универсального рецепта, конечно же, нет. Но определенные рекомендации сформулировать можно:

1) маркетинговый подход, или ориентация на нужды и потребности клиента;

2) производство качественной продукции и формирование постоянной клиентуры;

3) конкурентоспособная цена;

4) гибкое реагирование на требования рынка и оперативное изменение производственной программы;

5) непрерывное совершенствование продукции, раскрытие новых свойств материалов, поиск новых возможностей использования продукции и осуществление всего этого на производстве.

Перечисленные пять факторов по-своему универсальны. Они входят в понятие "маркетинговое управление", они же предполагают следование принципам системного управления качеством. И здесь нет никакого противоречия, поскольку принципы системного управления качеством органично вписываются в систему маркетингового управления предприятием.

Однако если создание такой системы является масштабным стратегическим проектом, предусматривающим не столько выработку свода определенных правил и следование им, сколько изменение мышления, "видения" сотрудниками своего предприятия, своей продукции, своего покупателя, то принципы системного управления качеством в большей степени ориентированы тактически, более регламентированы и могут принести весомый результат даже на самом раннем этапе их внедрения и практического использования. Поэтому принципы системного управления качеством видятся здесь как необходимое средство оперативных и эффективных изменений в деятельности промышленного предприятия.

В России внимание к управлению качеством неизменно и устойчиво растет. Качество создается на всех стадиях производства. Вместе с тем до сих пор основное внимание уделяется решению сиюминутных, "срочных" задач, нежели решению особо "важных", как это предусматривает один из главных принципов time-management. Необходимо время, чтобы владельцы бизнеса и менеджеры осознали, что управление качеством товаров и услуг, основанное на планировании и удовлетворении потребителей, — единственная основа их экономического процветания.

Управление качеством тесно связано с другими аспектами менеджмента, в частности, с корпоративным управлением, с управлением персоналом, производством, финансами и т. д. (рис. 1).

В складывающихся условиях следует говорить о системе управления качеством на предприятии (системе менеджмента качества), которая призвана создать уверенность потребителей (заказчиков) в качестве получаемой продукции, улучшить деятельность организации, повысить эффективность управления. Она, по существу, есть сквозной аспект системы управления предприятием. Управление качеством охватывает все процессы обеспечения, соблюдения, планирования, контроля и улучшения качества, с помощью которых в рамках системы качества происходит реализация перечисленных функций. Структура менеджмента качества приведена на рис. 2.

Обеспечение качества предполагает регулярную проверку хода реализации проекта в целях установления соответствия качества заранее определенным требованиям.

Управление качеством опирается на использование методов и видов деятельности оперативного характера, направленных на удовлетворение требований к качеству, нацеленных как на управление процессом, так и на уст-

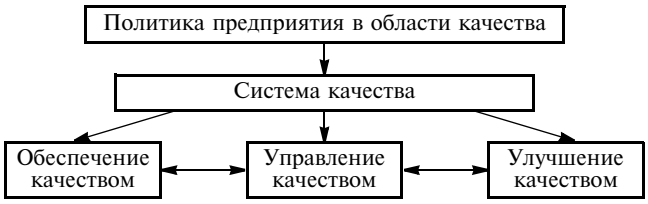



**Рис. 2. Структура менеджмента качества**

ранение причин неудовлетворительного функционирования на всех этапах "петли качества" при условии достижения заданного уровня экономической эффективности.

Улучшение качества базируется на проведении комплекса мероприятий в целях повышения эффективности и результативности всех производственных процессов, обеспечивающих положительный эффект как для самого предприятия, так и для его покупателей. Показатели качества многочисленны и разнообразны (таблица).

Практически каждый из указанных показателей может быть рассчитан математически, что предопределило использование в управлении качеством ряда статистических и математических методов [1, с. 238—273].

**Формулы расчета показателей качества (выборка)**

1. Коэффициент ремонтопригодности (готовности или технического использования): $K_г = T_о/(T_о + T_в)$, где $T_о$ — средняя наработка на отказ восстанавливаемого объекта, ч; $T_в$ — среднее время восстановления объекта после отказа, ч.

2. Коэффициент унификации технологических процессов (ТП): $K_{у.ТП} = H_{с.ТП}/H_{ТП}$, где $H_{с.ТП}$ — число наименований существующих ТП, заимствованных для производства нового продукта; $H_{ТП}$ — общее число наименований ТП изготовления (сумма заимствованных и вновь разработанных ТП).

3. Коэффициент прогрессивности технологических процессов: $K_{пр.ТП} = H_{пр.ТП}/H_{ТП}$, где $H_{пр.ТП}$ — число наименований прогрессивных ТП.

**Классификация показателей качества**

| Признаки классификации показателей | Показатели |
|---|---|
| Свойства продукции | 1. Назначение<br>2. Надежность<br>3. Технологичность<br>4. Эргономичность<br>5. Эстетичность<br>6. Стандартность<br>7. Патентный статус<br>8. Экономические показатели |
| Количество отражаемых свойств | 1. Единичные<br>2. Комплексные |
| Методы определения | 1. Инструментальные<br>2. Расчетные<br>3. Статистические<br>4. Органолептические<br>5. Экспертные<br>6. Социологические<br>7. Комбинированные |
| Стадия определения | 1. Прогноз<br>2. Проект<br>3. Производство<br>4. Эксплуатация |
| Размерность отражаемых показателей | 1. Безразмерные<br>2. Абсолютные<br>3. Приведенные |
| Значимость показателя при оценке качества | 1. Основная<br>2. Дополнительная |

4. Коэффициент стандартизации продукта: $K_{ст} = H_{ст}/H$, где $H_{ст}$ — число наименований (типоразмеров) составных частей продукта, выпускаемых по международным, государственным или фирменным стандартам; $H$ — общее число наименований (типоразмеров) составных частей продукта.

5. Коэффициент повторяемости составных частей продукта: $K_{повт} = n/H > 1$, где $n$ — общее число составных частей продукта.

6. Коэффициент удельной материалоемкости производства продукта: $K_{уд.м.пр} = M_{пр}/П_с$, где $M_{пр}$ — расход материалов на производство единицы продукта в натуральном или стоимостном выражении; $П_с$ — суммарный полезный эффект использования продукта за его нормативный срок службы (в единицах полезного эффекта в натуральном, денежном выражении или в баллах).

7. Коэффициент удельной себестоимости производства продукта: $K_{уд.с.пр} = C/П_c$, где $C$ — себестоимость продукта.

На основании значимостей $k_i$ и уровней $F_i$ параметров может быть определен сводный показатель $K$ уровня качества продукта путем взвешивания $i$ параметров по $k_i$, а при наличии цены — и конкурентоспособности [1]:

$$K = \left( \sum_{i=1}^{I} k_i F_{i\max} + \sum_{i=1}^{I} k_i F_{i\min} \right) 100\ \%,$$

где $I$ — число параметров, определяющих качество.

Существующие системы управления качеством разделяют на американскую, японскую и европейскую.

Особенностью американских предприятий в настоящее время является наличие четко оформленных систем управления качеством, для которых характерны:

жесткий контроль качества изготовления продукции с использованием статистических методов;

планирование производства по объемным и качественным показателям, административный контроль исполнения планов;

непрерывное совершенствование системы управления фирмой в целом.

Для японской системы управления качеством, являющейся дальнейшим развитием американской, характерна концепция полного контроля качества (принцип "Тагути"), предполагающая движение за улучшение качества на уровне компании, внимание не только к создаваемому продукту, но даже и к климату в коллективе, производящему этот продукт.

В европейских странах качество — это фактор обеспечения конкурентоспособности. Для реализации такой стратегии понадобились единые законодательные требования, единые стандарты, единые процессы проверки. Отличительными особенностями европейского подхода к решению проблем качества являются:

законодательная основа для проведения всех работ, связанных с оценкой и подтверждением качества;

гармонизация требований национальных стандартов, правил и процедур сертификации;

создание региональной инфраструктуры и сети национальных организаций, уполномоченных вести работы по сертификации продукции и систем качества, по

аккредитации лабораторий, регистрации специалистов по качеству и т. д.

Изучая системы качества, нельзя обойти стороной и российский (точнее советский) опыт. Исследования и разработки в области качества широко велись в нашей стране и в прошлом, однако самые эффективные системы управления качеством создавались и использовались преимущественно на предприятиях военно-промышленного комплекса (ВПК). Основные достижения в области управления качеством в ВПК представляли собой методы технологического обеспечения качества на стадии исследований и разработок по созданию новой продукции, методы статистического регулирования (в том числе автоматизированного) качества с использованием контрольных карт, специализированные государственные и отраслевые стандарты. К этим достижениям можно отнести комплексные системы управления качеством (КСУК): продукции, работ предприятия и отдельных подразделений, форм и методов работы с поставщиками.

В системах управления качеством важное место занимают стандарты и сертификация. Несмотря на то что каждая система управления качеством имеет свои локальные стандарты и свои подразделения сертификации, наибольшее распространение получила модель, описанная в стандартах ИСО 9000.

Чтобы высшее руководство могло управлять процессами в целях их улучшения, в стандартах определены восемь принципов менеджмента качества: 1) ориентация на потребителя; 2) лидерство руководителей; 3) вовлеченность работников; 4) процессный подход; 5) системный подход к менеджменту; 6) постоянное улучшение; 7) принятие решений, основанное на фактах; 8) взаимовыгодные отношения с поставщиками.

Популярность стандартов ИСО 9000 в России объясняется тем, что экспорт продукции, тендеры или выполнение совместных проектов с зарубежными компаниями на территории России требуют от партнеров соблюдения одних и тех же "правил игры". Такими правилами, в частности, являются единые требования к обеспечению качества выпускаемой продукции. Наличие сертификата качества, т. е. внедренных стандартов ИСО 9000 в организации, — гарантия того, что подход к обеспечению качества осуществляется на постоянной, системной основе.

К сожалению, до сих пор внедрение системы ИСО на российских предприятиях не приносит ожидаемых высоких результатов. Не приживаются в чистом виде и другие системы качества. Какой же выход существует? Какой подход к управлению качеством следует выбрать российским предприятиям?

Несомненно, что основа конкурентоспособности отечественной продукции на рынке — это качество производимой продукции согласно концепции "Петля качества", опирающейся на модель взаимозависимых видов деятельности, влияющих на качество продукции на различных стадиях: от определения потребностей до оценки их удовлетворения. Представляется, что следующим витком в развитии управления качеством станет реализация его по всем фазам жизненного цикла товара: от выявления потребности до момента утилизации. Уже в ближайшем будущем производитель, работа которого ранее заканчивалась в момент погрузки продукции в транспортное средство дилера, будет контролировать работу всех своих партнеров, начиная с закупки качественных комплектующих, сопровождая процесс продажи оказанием сервисных услуг и заканчивая решением вопросов утилизации.

Однако на пути к всеобщему качеству необходимо выделить ряд проблем, с которыми, вероятнее всего, столкнутся отечественные предприятия.

Первая (и главная) — методическая проблема, чаще всего не осознаваемая руководителями российских компаний. Она состоит в том, что единственно понятный инструментарий, которым они располагают, — это стандарты качества ИСО 9000, увы, неадекватные современной российской ситуации. Суть проблемы: с одной стороны, российским компаниям необходимы серьезные изменения в организационной структуре, в общей корпоративной культуре, в стиле и методах менеджмента, зачастую требуется смена номенклатуры создаваемой и производимой продукции; с другой стороны, стандарты ИСО 9000 весьма консервативны. Их использование для целей обеспечения качества опирается на принцип: документируй то, что делаешь, и делай то, что задокументировал. Если нарушить этот принцип, то система качества теряет свою приспособленность к аудиту (проверкам), поскольку аудиторы могут фактически проверять лишь документы и соответствие реальных процедур зафиксированным [2, с. 125].

Если же документировать существующую систему, то зафиксированная и реальная системы совпадут, но мало кого может устроить их уровень эффективности. Более того, документирование системы качества в том виде, в каком она реализована, приведет к стагнации качества продукции и процессов на низших уровнях.

Вторая проблема на пути становления системы качества — невозможность выполнения в России правил Джурана—Деминга, поскольку согласно их подходам доминирующая ответственность за качество ложится на систему менеджмента и ее создателей. Однако в России ситуация почти обратная — основная доля несоответствий приходится на исполнителей.

Третья проблема — неадекватность культурных основ российской промышленности и сферы услуг принципам, заложенным в существующих системах качества. Речь в данном случае идет о традиционных проблемах на крупных производствах — пьянстве на рабочих местах, укоренившемся с советских времен халатном отношении к работе (известно, что раньше большинство работников деньги "получали", а не зарабатывали), безынициативности и лености. Такое отношение к работе имеет не только личностное, но и рыночное объяснение — неудовлетворенный спрос со стороны потребителей и ненасыщенность рынка пока позволяют не уделять пристального внимания качеству.

Четвертая проблема состоит в том, что основные системы качества опираются на статистический анализ, а в российских условиях его почти невозможно применить в силу неполноты реализуемых этапов менеджмен-

та качества и, прежде всего, статистических методов управления качеством.

Пятая проблема — ментальность российских исполнителей вкупе с образом жизни и условиями труда. Из основных систем качества только японская система уделяет внимание человеку на рабочем месте. И здесь можно выявить особенность, присущую российским способам ведения бизнеса, — высокая роль человеческого (коллективного, межличностного, социального) фактора.

С учетом перечисленных проблем можно сформулировать ряд рекомендаций предприятиям, ведущих к победе в конкурентной борьбе и улучшающих систему качества.

1. В случае решения глобальной задачи построения системы качества необходимо в первую очередь разделить ее на части и начать с повышения качества производимой продукции. Это обеспечит устойчивый спрос, что, в свою очередь, сформирует постоянную клиентуру, а также увеличит ее численность. В результате экономические показатели предприятия будут расти, и появятся средства для реализации следующего этапа.

2. Надо не только создать широкую торговую сеть и рационально выстроенную систему доведения информации о товаре до потребителя, но и сформировать взаимоотношения с партнерами таким образом, чтобы покупатель оставался удовлетворенным на любом этапе обращения к товару (получение информации о товаре, покупка товара, использование товара, утилизация товара и т. д.).

3. Минимизировать издержки производства, для чего важно в первую очередь переосмыслить материально-техническую базу предприятия, провести (при необходимости) его реструктуризацию.

4. Надо учиться управлять финансами, прежде всего — организовать систему управленческого учета, которая может быть создана в четыре этапа:

а) формирование управленческого решения учетной задачи или анализ и описание существующего решения;

б) увязка принятых решений с существующими;

в) внедрение учетных технологий, в том числе Activity Based Costing, Target Costing, Strategic Cost Management;

г) бюджетирование.

Все четыре перечисленных обязательных этапа успешной деятельности предприятия рассматриваются в различных концепциях качества, но везде речь идет об улучшении. На большинстве же российских предприятий эти условия приходится создавать практически с нуля. При этом необходимо ставить вопрос о реформировании предприятий, их реструктуризации и создании новых элементов, исходя из четкого понимания философии управления качеством.

Успех массового распространения концепции управления качеством во многом определяется тем, как поведут себя лидеры российской экономики. Поскольку сырьевые отрасли менее чувствительны к требованиям в отношении качества их продукции, на первые позиции должны выйти крупные машиностроительные компании. Во-первых, это крупнейшие компании России, успешно работающие в последние годы, а во-вторых, они имеют армию поставщиков (не менее 400 ÷ 500 каждая) и могут оказать на них прямое влияние в отношении внедрения систем управления качеством.

На большинстве российских предприятий стартовые условия очень сложные, им в первую очередь необходима программа оздоровления систем менеджмента качества, предусматривающая следующие этапы.

1. Сначала необходимо провести товарный аудит с помощью *ABC*- и *XYZ*-анализов и определить положение предприятия на рынке, а также выявить основных конкурентов. Фундаментом аудита является *ABC*-анализ, с помощью которого отдельные элементы классифицируются и наглядно представляются по степени их важности для решения конкретной проблемы. Целесообразно проводить *ABC*-анализ именно совместно с *XYZ*-анализом. Основная идея *XYZ*-анализа состоит в группировании объектов по однородности анализируемых параметров (по коэффициенту вариации):

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 / n},$$

где $x_i$ — стоимость $i$-й ассортиментной позиции ранжированной совокупности; $\bar{x}$ — средняя стоимость; $n$ — число ассортиментных позиций.

Затем необходимо рассчитать коэффициент вариации:

$$\nu = (\sigma/\bar{x})100\ \%.$$

Коэффициент вариации позволяет сравнить между собой стабильность продаж нескольких товаров, имеющих разный объем реализации.

Удобство этого метода состоит, прежде всего, в том, что он может быть использован для многих целей анализа, начиная от товарного аудита продаж и заканчивая изучением результатов деятельности в сфере качества (дефекты, поломки, ошибки, отказы, рекламации, ремонты, возвраты продукции), а также себестоимости (объем потерь, затраты), сроков поставки (недостаточность запасов, ошибки в составлении счетов, срыв сроков поставок), безопасности (несчастные случаи, трагические ошибки, аварии).

Чтобы определить стартовые условия для оценки уровня качества продукции и производственных процессов предприятия, нужно организовать измерения и провести анализ уровней дефектности или уровней несоответствия в производстве.

2. Провести анализ и составить классификацию несоответствий и их причин, упорядочив их прежде всего по степени важности. Здесь, как и в задачах управленческого учета, уместно использование метода определения стоимости и других характеристик изделий с помощью функционально-стоимостного анализа (ФСА), поскольку именно ФСА выступает как операционно-ориентированная альтернатива традиционным финансовым подходам.

3. Ввести мотивацию за снижение несоответствий. При этом система мотивации, как представляется, должна делать упор на удовлетворение потребностей сотрудников согласно пирамиде Маслоу.

4. Согласовать возможности производства с требованиями конструкторской и технологической документации.

5. Разработать централизованную программу поэтапного снижения уровня несоответствий для предприятия в целом, внедрить систему Шухарта статисти-

ческого управления качеством. Применение контрольных карт по системе Шухарта может быть как по качественным, так и по количественным признакам.

6. Упорядочить производственные отношения между бригадами, цехами, производствами на основе цепочки "изготовитель—поставщик—потребитель", разработать документированную систему качества.

7. Сформировать систему работы с внешними поставщиками на основе стандартов стратегического приемочного контроля, исходя из принципа распределения приоритетов. В целом работа с поставщиком должна охватывать:

выходной контроль продукции поставщиком в соответствии с требованиями потребителя;

входной контроль потребителем и обратную связь по результатам контроля;

инспекции и аудит потребителем продукции, процессов, систем качества;

сертификационный аудит системы качества поставщика;

внедрение системы оценки качества поставок;

оценку (составление рейтинга) поставщиков;

совместную работу цепочки "потребитель—поставщик" по улучшению качества поставок;

решение ряда других стратегических задач, включая инвестиции.

Подводя итог, можно сказать следующее:

1) в настоящий момент в России назрела острая необходимость внедрения системы качества на предприятии;

2) именно система качества на предприятии предопределит успех отечественных компаний в конкурентной борьбе с западными производителями после вступления России в ВТО;

3) у отечественных предприятий осталось мало времени на внедрение систем управления качеством, а потому эта задача должна быть разбита на несколько подэтапов;

4) управление качеством опирается на использование методов и процедур тактического характера для достижения экономической эффективности;

5) существуют различные методы и подходы, обязательные при внедрении системы качества, которые руководителям российских предприятий придется освоить в максимально короткое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волков О. И., Скляренко В. К.** Экономика предприятия. М.: Инфра. 2003.
2. **Мазур И. И., Шапиро В. К.** Управление качеством. М.: Омега-Л, 2006.
3. **Окрепилов В. В.** Управление качеством. СПб.: Наука, 2006.
4. **Кузин Б., Юрьев В.** Методы и модели управления фирмой. СПб.: Питер, 2001.
5. **Фатхутдинов В. А.** Стратегический маркетинг. М.: Бизнес-школа "Интел-синтез", 2000.

---

УДК 330.44:330.46

А. В. АНДРЕЙЧИКОВ, О. Н. АНДРЕЙЧИКОВА, доктора технических наук
(РГУ Инновационных технологий и предпринимательства)

# Оценка предполагаемого спроса на потребительские товары методом анализа иерархий[1]

Описан подход к построению качественных моделей для оценки вероятного спроса на потребительские товары метода анализа иерархий. Рассмотрен пример прогнозирования спроса на легковые автомобили класса "В".

В настоящее время ОАО "АВТОВАЗ" выпустило новую серию автомобилей "Калина" класса "В". Основными конкурентами новых автомобилей на российском рынке являются автомобили Hundai "Accent", Hundai "Getz", Renault "Logan", Renault "Symbol" и Volkswagen "Pointer".

В силу специфики российского рынка легковых автомобилей конкурентами новой продукции автопрома являются два из приведенных выше автомобиля, а именно Hundai "Accent" и Renault "Logan", которые относятся к классу "С". Это обусловлено тем, что наиболее значимым для потребителя фактором является цена автомобиля, а также то, что данные зарубежные модели по стоимости наиболее близки к автомобилю "Калина", хотя и немного больше него по габаритным размерам. Однако эти различия сглаживаются тем, что производитель планирует выпускать автомобиль "Калина" с разным типом кузова (седан, универсал и хэтчбек), что приближает новую продукцию к аналогам.

Для определения вероятного спроса на новые автомобили класса "В" необходимо сегментировать рынок и выявить потребительские предпочтения каждого сегмента по потребительским свойствам автомобилей.

На рынке легковых автомобилей наибольшее значение имеет сегментация покупателей по социально-демографическим признакам: возрасту, численности и этапам жизни семьи, уровню доходов, образованию и т. д., и, поскольку автомобили являются товаром длительного пользования, при их покупке важное значение имеют иные факторы, нежели при покупке товаров повседневного спроса.

На основании проведенных исследований были выявлены пять сегментов рынка.

1. Сегмент "Зрелые пары" представлен людьми в возрасте 45 ÷ 60 лет, у которых есть семья и самостоятельные дети старше 18 лет. У большинства потребителей (около 80 %) этой группы с достаточно стабильным

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 07-08-12011-офи.

уровнем дохода (15 ÷ 25 тыс. руб. в месяц) есть недорогой отечественный автомобиль.

2. Сегмент "Молодые пары" представлен молодыми энергичными людьми в возрасте 25—35 лет, которые уже многого достигли в жизни, и цель которых — дальнейший карьерный рост. Они имеют стабильный доход (15 ÷ 25 тыс. руб. в месяц), планируют завести семью или уже имеют, но пока без детей, формируют свою систему ценностей и стремятся в этом к сегменту "Сéмьи со средним доходом". Часть из них уже имеет подержанный импортный автомобиль высокой стоимости, другая часть предпочла новый импортный автомобиль. Потребители этого сегмента используют автомобиль в повседневной жизни.

3. Сегмент "Семьи со средним доходом" составляют люди в возрасте 35 ÷ 60 лет. Это семейные люди, у которых есть в среднем один ребенок младше 18 лет. В большинстве своем это менеджеры среднего и высшего звеньев, государственные служащие, чей уровень дохода выше 30 тыс. руб. в месяц. Они уже имеют подержанный или новый импортный автомобиль. Некоторые из них собираются приобрести второй.

4. Сегмент "Семьи с низким доходом" — люди в возрасте 25 ÷ 45 лет, в среднем имеющие одного ребенка младше 18 лет, с небольшим, но стабильным заработком (до 15 тыс. руб. в месяц). В этих семьях, как правило, уже есть либо подержанная, либо новая отечественная машина.

5. Сегмент "Одинокие молодые люди" — люди от 20 до 30 лет, работающие и получающие небольшой заработок. Это одинокие люди, без семьи и детей, которые только начинают планировать свою жизнь и чей уровень дохода (заработок, возможные накопления и/или помощь/наследство родителей) позволяет приобрести недорогой автомобиль.

Основными потребительскими требованиями, предъявляемыми к легковым автомобилям на российском рынке, являются: цена, производительность, комфортабельность, безопасность, экономичность, дизайн, надежность, уровень сервисного технического обслуживания автомобиля. Это обобщенные требования, которые конкретизируются более частными, например, такое потребительское требование, как "производительность" конкретизируется частными требованиями: максимальная скорость автомобиля, время его разгона до скорости 100 км/ч, мощность двигателя. Аналогичная конкретизация может быть проведена по всем остальным обобщенным требованиям. Рассматриваемая альтернатива автомобиля, спрос на который определяют, обладает вполне конкретными свойствами.

Для проведения исследования следует выделить и оценить те свойства автомобилей, которые представляют интерес для потребителей (потребительские требования). Изначально такими свойствами могут быть показатели, входящие в техническую характеристику автомобиля, например его скорость, мощность, а также качества, определяемые экспертами и выражаемые уровнем проявления конкретных свойств, например, безопасность при столкновении может быть охарактеризована как очень высокая, высокая, низкая, очень низкая.

Для моделирования исследуемого процесса применили метод анализа иерархий [1]. Для этого факторы, влияющие на уровень спроса автомобилей на рынке, объединили иерархической структурой (рис. 1).

Фокус иерархии (уровень 1) определяет цель исследования, т. е. прогнозирование спроса на ассортиментные группы легковых автомобилей класса "В" на российском рынке. Далее располагаются сегменты рынка (уровень 2), обобщенные потребительские требования (уровень 3), частные потребительские требования (уровень 4) и ассортиментные группы автомобилей (уровень 5). Оценка производилась методом парных сравнений путем заполнения матриц.

Математическая обработка матриц парных сравнений позволила определить следующее.

1. Векторы приоритетов альтернатив по обобщенным потребительским свойствам (рис. 2), анализ которых показал, что автомобиль "Калина" (альтернатива $A_1$) превосходит по уровням сервисного технического обслуживания (ТО), цены, дизайна, но имеет самый низкий уровень по надежности.

2. Векторы приоритетов по обобщенным потребительским требованиям (рис. 3), отражающие потребительские профили сегментов рынка, анализ которых показал:

для потребителей сегмента "Зрелые пары" наиболее значимыми являются цена, экономичность автомобиля и сервисное ТО после продажи;

потребителей сегмента "Молодые пары" в большей степени интересуют такие свойства автомобилей, как цена, дизайн, надежность и сервисное ТО после продажи;

для потребителей сегмента "Семьи со средним достатком" одинаково важны практически все потребительские свойства, кроме комфортабельности и дизайна, первому предъявляются самые высокие требования, второму — самые низкие;

для потребителей сегмента "Семьи с низким достатком" главными критериями являются цена и экономичность;

для потребителей сегмента "Одинокие молодые люди" особенно важна производительность автомобиля, а также цена и комфортабельность.

На основании полученных векторов по приоритетам по обобщенным потребительским требованиям каждого сегмента определено их сходство по выражению [2]

$$m(S_j \cap S_k) = \sum_{i=1}^{n} \min(x_{ij}, x_{ik}),$$

где $S_i$, $S_k$ — два пересекающихся множества, элементы которых представлены значениями векторов ($x_{ij}$ и $x_{ik}$) приоритетов по обобщенным потребительским требованиям, характеризующих два сегмента рынка: $S_i$ и $S_k$; $n$ — число обобщенных потребительских требований, представляющее объединение множеств потребительских требований двух сравниваемых сегментов рынка $S_i$ и $S_k$.

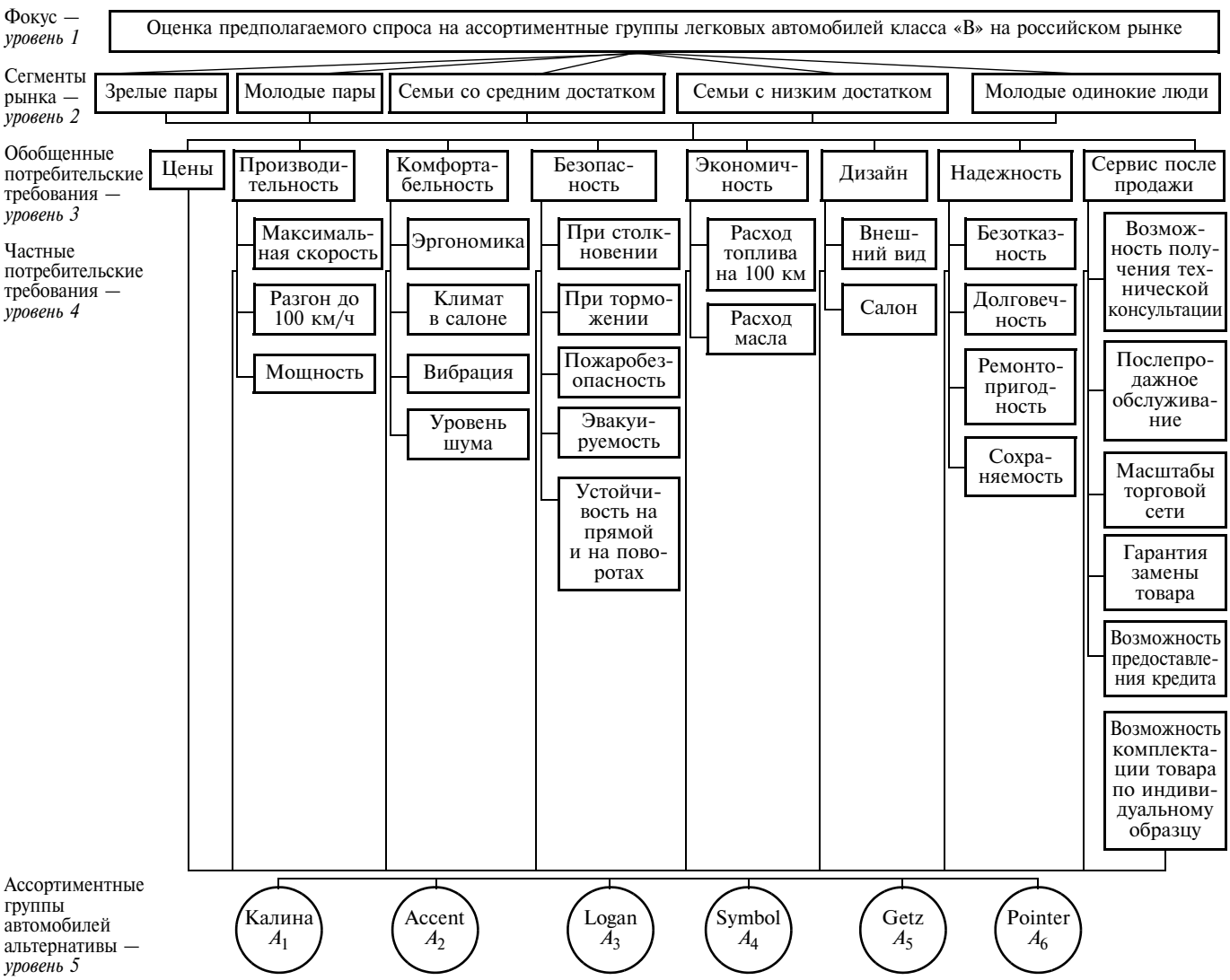



**Рис. 1. Иерархическая структура для оценки спроса на ассортиментные группы автомобилей**

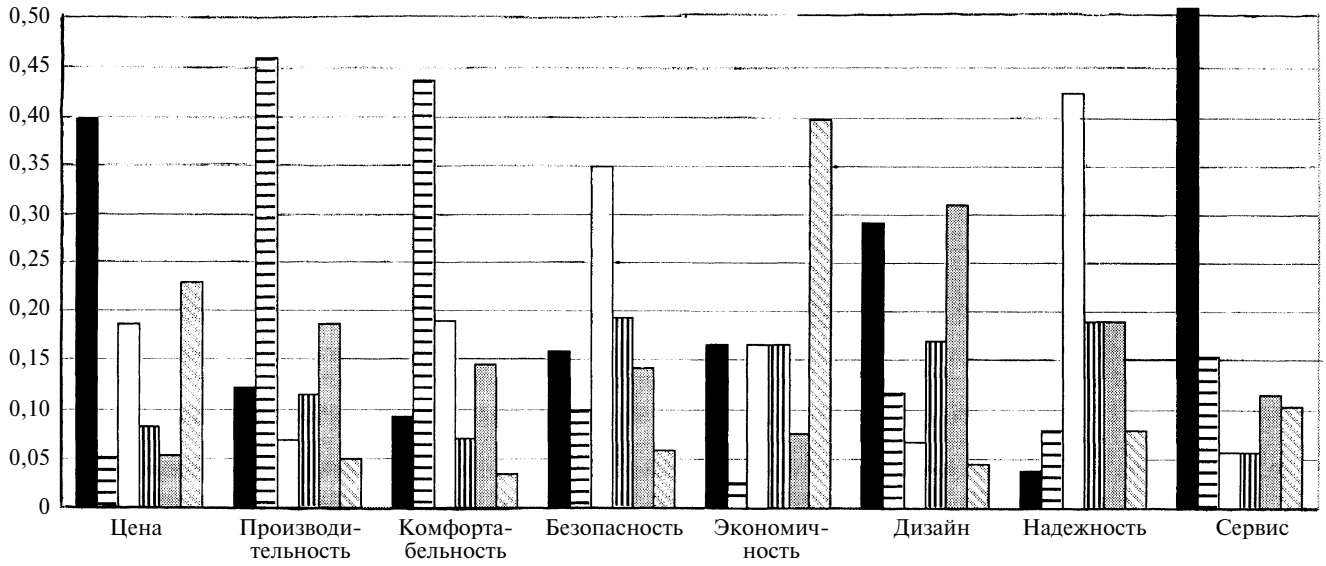



**Рис. 2. Векторы приоритетов альтернатив по обобщенным потребительским требованиям:**
■ — $A_1$; ⊟ — $A_2$; □ — $A_3$; ▥ — $A_4$; ▨ — $A_5$; ▧ — $A_6$

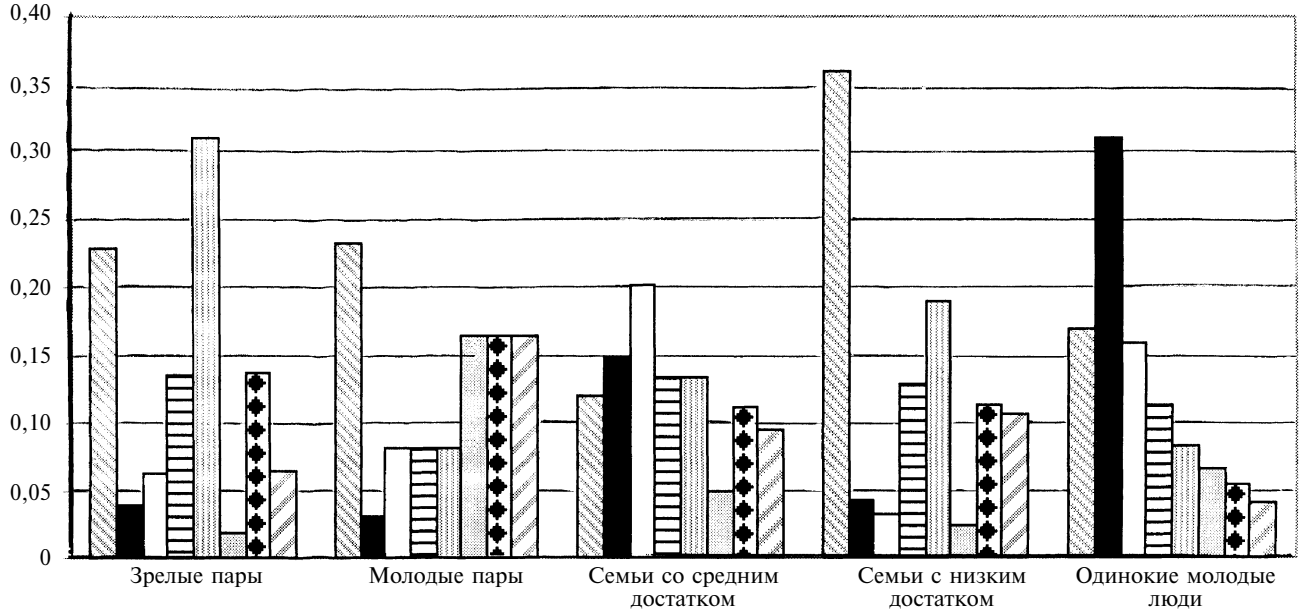
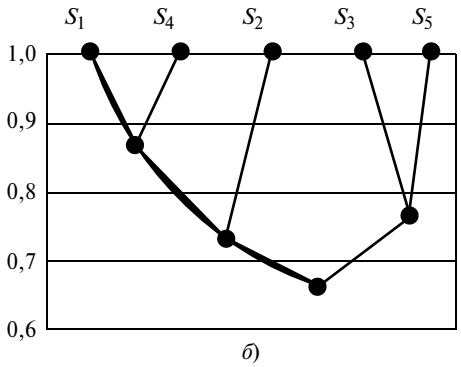



**Рис. 3. Потребительские профили сегментов рынка:**
▨ — цена; ■ — производительность; □ — комфортабельность; ⊟ — безопасность; ▥ — экономичность; ◆ — надежность; ◉ — дизайн; ▞ — сервисное ТО

| $S_i$ \ $S_i$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | 1 | 0,71 | 0,69 | 0,82 | 0,58 |
| $S_2$ | 0,71 | 1 | 0,65 | 0,70 | 0,61 |
| $S_3$ | 0,69 | 0,65 | 1 | 0,69 | 0,78 |
| $S_4$ | 0,82 | 0,70 | 0,69 | 1 | 0,56 |
| $S_5$ | 0,58 | 0,61 | 0,78 | 0,56 | 1 |

*а*)




*б*)

| Класс | Мера сходства |
|---|---|
| $H_1 = S_{1,4}$ | 0,82 |
| $H_2 = S_{3,5}$ | 0,78 |
| $H_3 = S_{1,4,2}$ | 0,71 |
| $H_4 = S_{1,4,2,3,5}$ | 0,63 |

**Рис. 4. Матрица (*а*) и иерархическая дендрограмма (*б*) сходства пяти сегментов рынка**

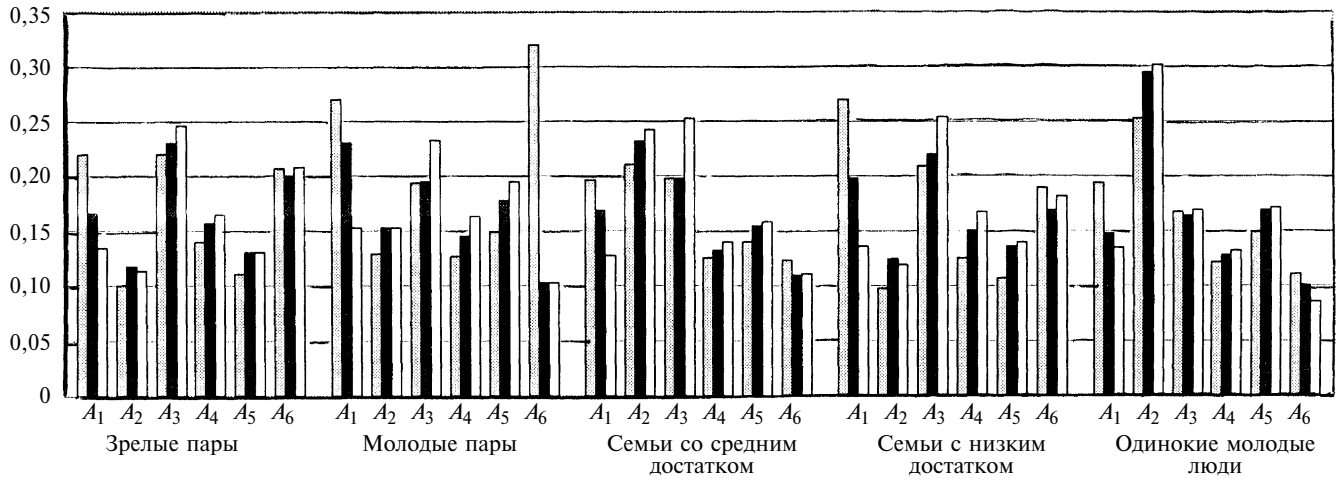



**Рис. 5. Векторы приоритетов альтернатив для сегментов рынка:**
▨ — при различной цене и сервисном ТО автомобиля; ■ — при равной цене; □ — при равной цене и сервисном ТО

Кластерный анализ сегментов рынка по обобщенным потребительским требованиям проведен с помощью матрицы $S_i$ и дендрограммы сходства сегментов $S_i$ (рис. 4) , построенной методом медианы [1], где $S_1$ — "Зрелые пары", $S_2$ — "Молодые пары", $S_3$ — "Семьи со средним доходом", $S_4$ — "Семьи с низким доходом", $S_5$ — "Молодые одинокие люди".

Кластерный анализ показал, что по обобщенным потребительским требованиям наиболее близкими являются сегменты рынка $S_1$, $S_4$, $S_2$ — класс $H_3$ и $S_3$, $S_5$ — класс $H_2$. Эта информация представляет интерес при принятии решений о стратегиях завоевания тех или иных сегментов рынка: переход на более близкие или более далекие по сходству потребительские профили сегментов рынка.

Далее на основании векторов приоритетов альтернатив по обобщенным потребительским требованиям (см. рис. 2) и векторов приоритетов потребительских профилей сегментов рынка (см. рис. 3) определяют векторы приоритетов альтернатив для каждого сегмента (рис. 5). Их значения показывают вероятную долю рыночного сегмента, которую займет на нем та или иная альтернатива — автомобиль. Например, ассортиментная группа автомобилей марки "Калина" займет 27 % рыночного сегмента "Молодые пары" и такую же долю сегмента "Семьи с низким доходом". В сегменте "Зрелые пары" для альтернативы $A_1$ доля рынка составляет 22 %, что не ниже, чем у ближайших конкурентов: $A_3$ — 22 и $A_6$ — 20,6 %. Очень сильная конкуренция для $A_1$ наблюдается в сегменте "Одинокие молодые люди", меньше — в сегментах "Семьи со средним доходом" и "Зрелые пары". На основании информации о предполагаемой доле сегмента, которую может занять тот или иной автомобиль, можно оценить уровень конкуренции со стороны других автомобилей относительно продукции ОАО "АВТОВАЗ".

Анализ векторов приоритетов альтернатив для рыночных сегментов (см. рис. 5) показал, что интересующая нас альтернатива $A_1$ имеет значительные преимущества относительно других автомобилей на двух сегментах рынка: "Молодые пары" и "Семьи с низким доходом".

### Влияние макроэкономической ситуации на автомобильный рынок

Существенное влияние на автомобильный рынок России может оказать вступление России во Всемирную торговую организацию (ВТО). Это приведет к существенному снижению таможенных пошлин на ввозимые в страну автомобили, а следовательно, к значительному снижению цен. Кроме того, существенно повысится качество сервисного технического обслуживания (ТО) иномарок на территории России.

Если предположить, что при вступлении России в ВТО цены на все рассматриваемые нами автомобили сравняются, а сервисное ТО иномарок станет таким же, как автомобилей серии "Калина", то занимаемые ими доли в сегментах изменятся так, как показано на рис. 5.

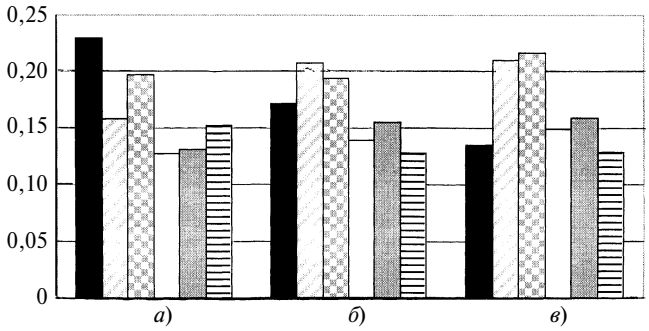



**Рис. 6. Векторы приоритетов альтернатив для всего рынка автомобилей класса "В":**
■ — $A_1$; ▨ — $A_2$; ▩ — $A_3$; □ — $A_4$; ▧ — $A_5$; ⊟ — $A_6$

Свертка векторов приоритетов альтернатив относительно фокуса иерархии (см. рис. 1) при одинаковой значимости сегментов позволяет получить средние значения долей по всем пяти сегментам, которые могут занять рассматриваемые модели автомобилей. На рис. 6 приведены три вектора приоритетов альтернатив относительно фокуса иерархии. Векторы рассчитаны для трех иерархий с учетом:

1) сегодняшнего уровня цен и качества сервисного ТО после продажи автомобилей класса "В" (см. рис. 6, *а*);

2) равных цен на все анализируемые автомобили (см. рис. 6, *б*);

3) равных цен и одинакового качества сервисного ТО (см. рис. 6, *в*).

Анализ векторов приоритетов показал, что доля рынка для $A_1$ (автомобили "Калина") при наличии ее преимуществ перед всеми другими альтернативами по цене и сервису ТО после продажи уменьшается с 23 до 17,2 % при равных ценах и до 13,5 % при равных ценах и одинаковом качестве сервисного ТО для всех альтернатив.

### Уровень спроса на автомобили ассортиментной группы "Калина"

При оценке уровня спроса на автомобили ассортиментной группы "Калина" будем опираться на предыдущий анализ. Анализируемая ассортиментная группа включает в себя семь моделей автомобилей марки "Калина" (табл. 1—3).

Оценка уровня спроса на различные модели автомобилей проводится с позиции их производителя — АВТОВАЗа с целью планирования объемов производства каждой модели и определения доли собственных ресурсов, которые целесообразно задействовать для производства каждой модели.

Для решения поставленной задачи иерархию (см. рис. 1), с позиций которой оценивается спрос на ассортиментные группы, преобразовывают в новую иерархию (рис. 7). Фокус иерархии определяет новую цель исследования: оценка спроса на модели автомобилей ассортиментной группы "Калина" для рынка в целом с учетом привлекательности сегментов рынка для производителя. Векторы приоритетов альтернатив по обобщенным потребительским требованиям по каждому

*Таблица 1*

**Технические характеристики моделей автомобилей ассортиментной группы "Калина"**

| Модель автомобиля | Тип кузова | Класс двигателя | Комплектация | Розничная цена, руб. | Максимальная скорость, км/ч | Время разгона до 100 км/ч | Мощность двигателя, л. с. | Расход топлива на 100 км пути, л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11173Н | Универсал | 8 | Норма | 226 800 | 165 | 13,4 | 81 | 10,0 |
| 11176Л | Универсал | 16 | Люкс | 259 200 | 180 | 12,0 | 89 | 10,7 |
| 11183Н | Седан | 8 | Норма | 216 000 | 165 | 13,0 | 81 | 9,8 |
| 11186Л | Седан | 16 | Люкс | 248 400 | 182 | 11,7 | 89 | 10,5 |
| 11193Н | Хэтчбек | 8 | Норма | 202 500 | 170 | 12,8 | 81 | 9,8 |
| 11196Н | Хэтчбек | 16 | Норма | 218 700 | 185 | 11,5 | 89 | 10,2 |
| 11196Л | Хэтчбек | 16 | Люкс | 243 000 | 190 | 11,0 | 89 | 10,5 |

*Таблица 2*

**Предлагаемые комплектации, влияющие на комфортабельность автомобиля**

| Комплектация | Электроусилитель | Кондиционер | Электростеклоподъемники | Регулировка/подогрев зеркал | Бортовой компьютер |
|---|---|---|---|---|---|
| Норма | + | — | Передние | — | — |
| Люкс | + | + | Передние/задние | + | + |

*Таблица 3*

**Показатели безопасности автомобилей**

| Модель автомобиля | Активная безопасность (баллы) | Пассивная безопасность (баллы) | Подушки безопасности | Усилены тормозной системы | Задние подголовники | Противотуманные фары |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11173Н | 2 | 3 | — | — | — | — |
| 11176Л | 4 | 3 | + | + | + | + |
| 11183Н | 3 | 3 | — | — | — | — |
| 11186Л | 5 | 3 | + | + | + | + |
| 11193Н | 3 | 2 | — | — | — | — |
| 11196Н | 4 | 2 | — | + | — | — |
| 11196Л | 5 | 2 | + | + | + | + |

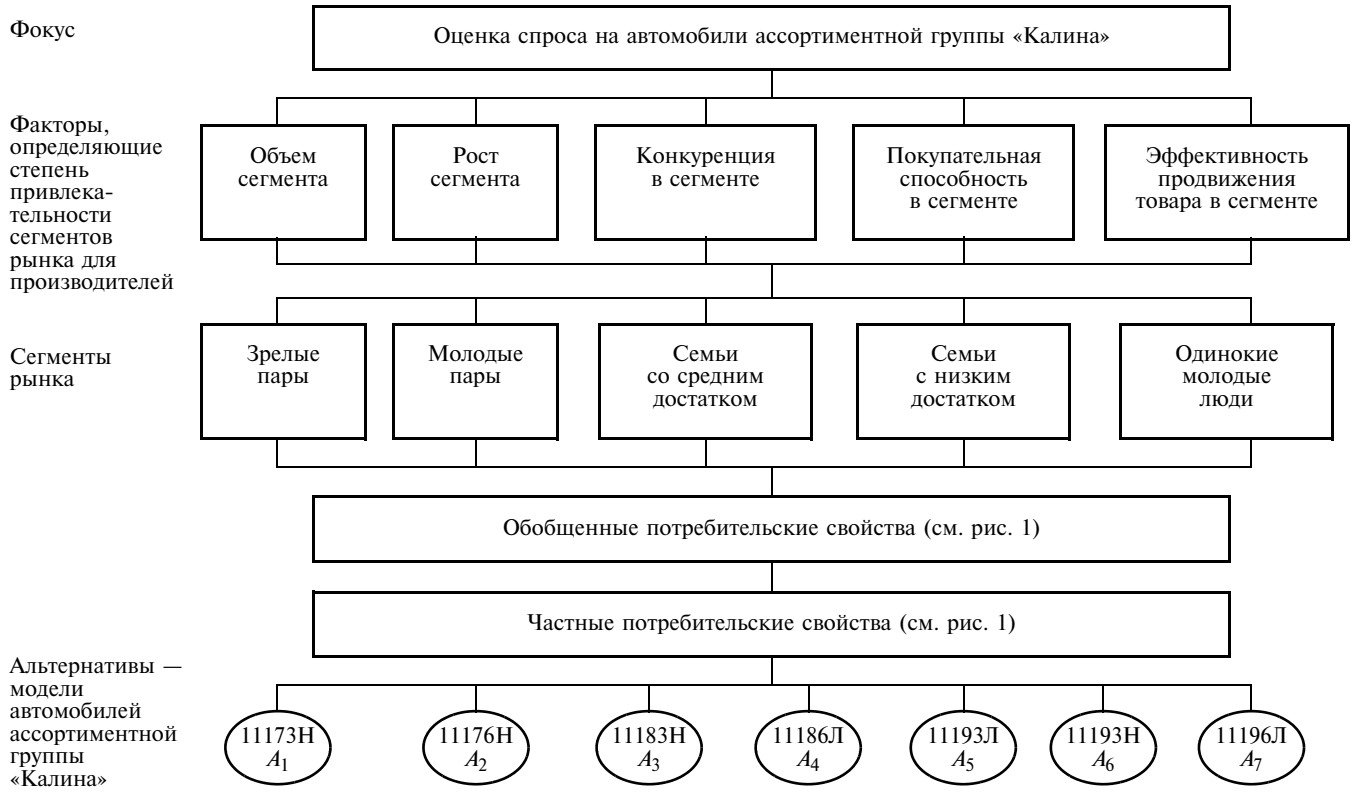



**Рис. 7. Иерархия для оценки спроса на модели автомобилей ассортиментной группы "Калина"**

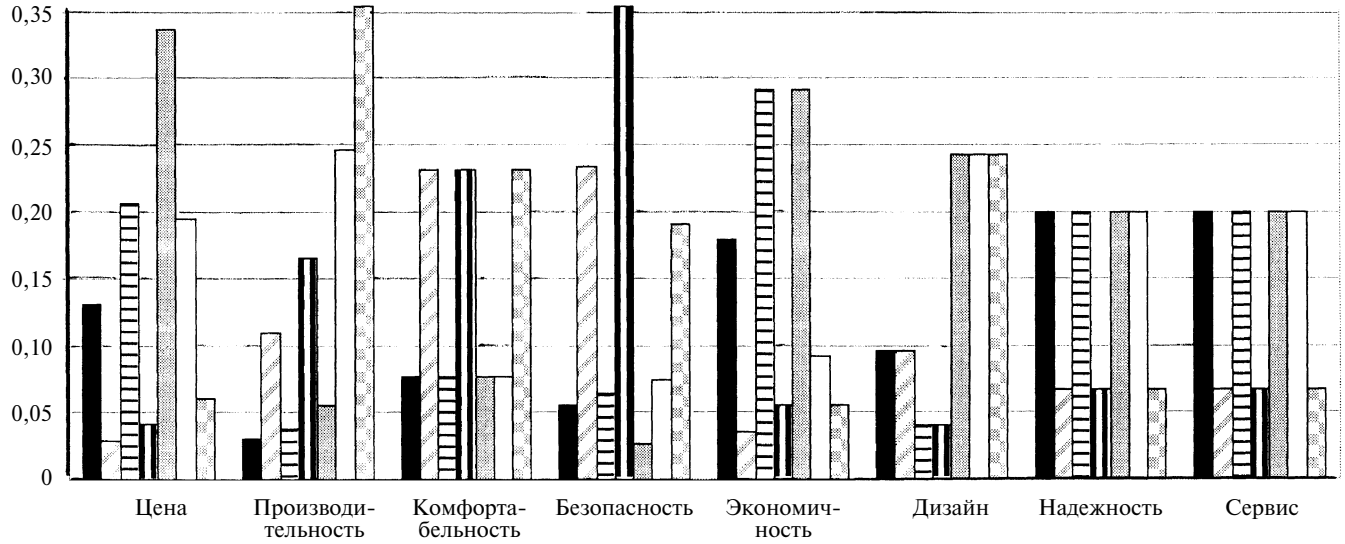



**Рис. 8. Векторы приоритетов альтернатив — моделей автомобилей ассортиментной группы "Калина" по обобщенным потребительским требованиям:**
■ — $A_1$; ▨ — $A_2$; ⊟ — $A_3$; ▥ — $A_4$; ▩ — $A_5$; □ — $A_6$; ◪ — $A_7$

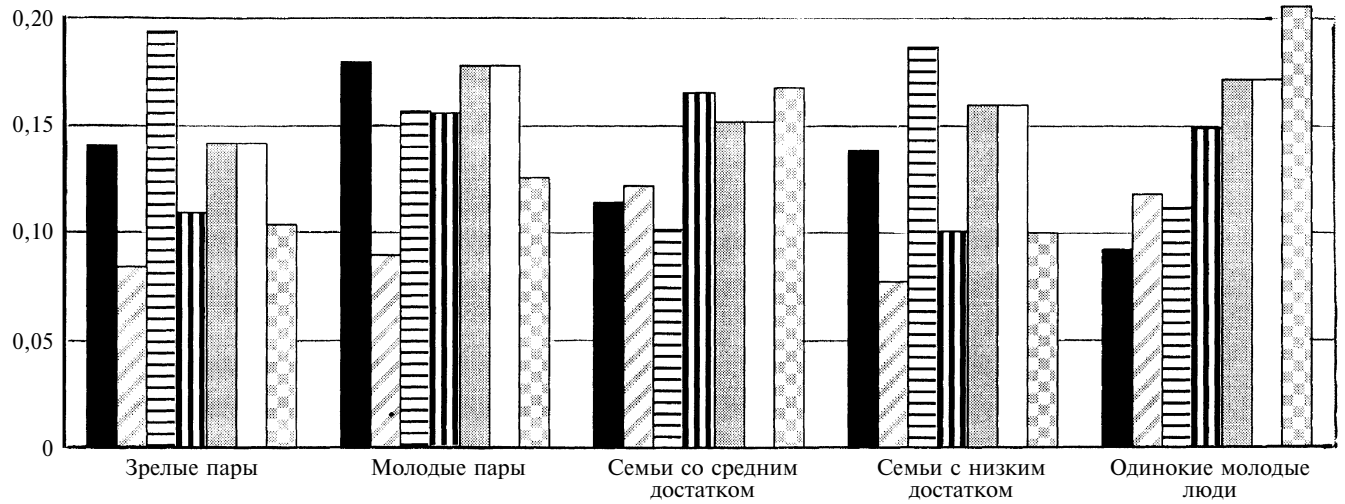



**Рис. 9. Векторы приоритетов альтернатив для сегментов рынка**
■ — $A_1$; ▨ — $A_2$; ⊟ — $A_3$; ▥ — $A_4$; ▩ — $A_5$; ◪ — $A_6$

сегменту приведены соответственно на рис. 8 и 9. Профили сегментов по потребительским свойствам остаются теми же, что и в предыдущей задаче (см. рис. 3).

Между фокусом иерархии и уровнем сегментов помещают факторы, позволяющие оценить степень привлекательности сегментов для производителя: объем сегмента, рост сегмента, конкуренция в сегменте, покупательная способность сегмента, эффективность продвижения товара.

Объем сегмента — совокупный показатель, который определяет эксперт на основании доли данного сегмента и показателей спроса в данном сегменте за рассматриваемый период времени.

Рост сегмента определяют с учетом перспектив роста продаж в данном сегменте и увеличения его размеров, используя статистические данные о демографической и экономической ситуации в стране.

Конкуренцию в сегменте определяют на основании анализа характеристик автомобилей ближайших конкурентов.

О покупательной способности сегмента можно судить по данным о доходах, решимости покупателей и характере спроса.

Эффективность продвижения товара, так же как и способы стимулирования сбыта в конкретном сегменте, учитывает уровень восприимчивости к рекламе различных категорий покупателей и эффективности мер стимулирования относительно конкретного потребителя. Если для освоения привлекательного на первый взгляд сегмента требуется затратить значительные средства для продвижения продукта, уровень привлекательности данной категории покупателей снижается.

Нижний уровень иерархии — альтернативы, т. е. семь моделей ассортиментной группы "Калина".

*Таблица 4*

**Матрица парных сравнений факторов, определяющих привлекательность сегментов**

| Фокус | Объем | Рост | Конкуренция | Покупательная способность | Эффективность продвижения товара | Вектор приоритетов |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Объем | 1 | 5 | 1/5 | 1/7 | 1/2 | 0,206 |
| Рост | — | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/2 | 0,217 |
| Конкуренция | — | — | 1 | 1/3 | 5 | 0,194 |
| Покупательная способность | — | — | — | 1 | 7 | 0,311 |
| Эффективность продвижения | — | — | — | — | 1 | 0,072 |

*Таблица 5*

**Оценка привлекательности сегментов рынка**

| Сегмент рынка | Факторы, определяющие привлекательность сегмента | | | | | Результирующий вектор приоритетов |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Объем сегмента | Рост сегмента | Конкуренция | Покупательная способность | Эффективность продвижения товара | |
| | Вектор приоритетов факторов | | | | | |
| | 0,206 | 0,217 | 0,194 | 0,311 | 0,072 | |
| Зрелые пары | 0,056 | 0,146 | 0,178 | 0,085 | 0,534 | 0,142 |
| Молодые пары | 0,109 | 0,041 | 0,063 | 0,209 | 0,052 | 0,112 |
| Семьи со средним доходом | 0,109 | 0,146 | 0,348 | 0,527 | 0,052 | 0,290 |
| Семьи с низким доходом | 0,295 | 0,520 | 0,063 | 0,041 | 0,112 | 0,207 |
| Одинокие молодые люди | 0,430 | 0,146 | 0,348 | 0,139 | 0,250 | 0,250 |

*Таблица 6*

**Определение вектора приоритетов альтернатив относительно фокуса иерархии**

| Альтернативы ассортиментной группы автомобилей "Калина" (тип кузова, комплектация) | Зрелые пары | Молодые пары | Семьи со средним достатком | Семьи с низким достатком | Одинокаие молодые люди | Результирующий вектор приоритетов |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Вектор приоритетов привлекательности сегмента | | | | | |
| | 0,142 | 0,112 | 0,290 | 0,207 | 0,250 | |
| $A_1$ (универсал, норма) | 0,141 | 0,180 | 0,114 | 0,139 | 0,092 | 0,13 |
| $A_2$ (универсал, люкс) | 0,084 | 0,090 | 0,122 | 0,077 | 0,118 | 0,1 |
| $A_3$ (седан, норма) | 0,194 | 0,157 | 0,102 | 0,187 | 0,112 | 0,14 |
| $A_4$ (седан, люкс) | 0,110 | 0,156 | 0,166 | 0,101 | 0,149 | 0,14 |
| $A_5$ (хэтчбек, норма) | 0,223 | 0,218 | 0,161 | 0,236 | 0,149 | 0,19 |
| $A_6$ (хэтчбек, норма) | 0,142 | 0,178 | 0,152 | 0,160 | 0,172 | 0,16 |
| $A_7$ (хэтчбек, люкс) | 0,104 | 0,126 | 0,168 | 0,100 | 0,206 | 0,16 |

Рассмотрим три верхних уровня иерархии: фокус, факторы, определяющие степень привлекательности сегментов рынка, и сегменты с целью оценки влияния последних на уровень спроса рассматриваемой ассортиментной группы. Для этого построим матрицу парных сравнений факторов, определяющих привлекательность сегментов относительно фокуса (табл. 4) и пять матриц парных сравнений сегментов относительно каждого фактора второго уровня иерархии. При заполнении первой матрицы парных сравнений эксперт отвечал на вопрос: какой из факторов определяет большую привлекательность сегментов для производителя и на сколько больше?

Ниже приведены вопросы, на которые отвечал эксперт при заполнении последующих пяти матриц парных сравнений.

| **Фактор, определяющий привлекательность** | **Вопрос** |
|---|---|
| Объем сегмента . . . . . | Какой сегмент по числу потенциальных потребителей автомобилей больше и на сколько? |
| Рост сегмента . . . . . | Какой сегмент по росту продаж и увеличению размеров более предпочтителен в ближайшее время и на сколько? |

Конкуренция . . . . . На каком сегменте конкурентоспособность автомобилей "Калина" выше и на сколько?

Покупательная способность . . . . . На каком сегменте покупательная способность потребителей, ориентированных на автомобили класса "В", выше и на сколько?

Эффективность продвижения товара . . . . . В каком сегменте восприимчивость потребителей к рекламе автомобилей "Калина" выше и на сколько?

Векторы приоритетов, характеризующие степень привлекательности сегментов рынка по каждому фактору, вектор приоритетов важности факторов и результирующей вектор приоритетов сегментов относительно фокуса иерархии приведены в табл. 5.

Определим вектор приоритетов альтернатив относительно фокуса иерархии с учетом привлекательности сегментов для производителя ассортиментной группы автомобилей "Калина" и векторов приоритетов альтернатив для сегментов рынка (см. рис. 9), результаты приведены в табл. 6.

Результирующий вектор приоритетов показывает, что наибольшим спросом будут пользоваться автомобили "Калина" с кузовом хэтчбек, а для моделей предпочтительнее будет комплектация "Норма".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Саати Т. Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.

2. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2004. 464 с.

---

УДК 338

Л. М. КЛЯЧКО, канд. техн. наук (ОАО ЦНИИ "Курс")

# Объект, элементы, факторы, критерии и показатели экономической безопасности системы

Под экономической безопасностью социально-экономической системы следует понимать совокупность свойств состояния ее производственной подсистемы, обеспечивающую возможность достижения всех ее целей. Очевидно, что для физического лица и страны в целом, а также для всех ее промежуточных состояний экономическая безопасность может иметь специфические содержание и формы проявления. При этом связь между уровнями экономической безопасности физического лица и государства неоднозначна. Низкому уровню экономической безопасности физических лиц может соответствовать как низкий, так и высокий уровень экономической безопасности государства. Аналогично и высокий уровень экономической безопасности физического лица может быть реализован на фоне как низкого, так и высокого уровней экономической безопасности страны. Неоднозначно и соотношение между уровнями экономической безопасности производственных организаций и государства, так как в условиях репрессивных режимов они могут всецело зависеть от действий властей, а мощные производственные организации в демократических режимах могут работать в интересах как страны, так и внешнего рынка, используя при этом местные ресурсы и не уделяя должного внимания экономическому обеспечению функционирования внутренних государственных структур.

Существенными моментами, которые следует учитывать при характеристике объекта экономической безопасности России, являются ее политический статус великой державы и статус государства, обладающего ядерным оружием. Очевидное противоречие между этими двумя обстоятельствами, с одной стороны, и состоянием российской экономики, неадекватным этим обстоятельствам, с другой стороны, приводит к выводу о том, что объектом экономической безопасности России является экономика великой державы, т. е. экономика, способная обеспечить достойные уровень и качество жизни гражданам страны, их экономическую безопасность, а также адекватность экономики фактическому военно-политическому статусу России в современном мире. Сочетание этих обстоятельств дает основание назвать объектом экономической безопасности экономику России как великой державы, так как если бы Россия не имела указанного военно-политического статуса, то в настоящее время ее экономическую безопасность можно было бы охарактеризовать как просто современную, технологически динамичную и эффективную экономику, ориентированную на спрос и в силу своей мобильности способную отвечать на различные изменения и вызовы окружающего ее мира. Следует отметить, что в рыночных условиях содержание предмета экономической безопасности — это не старое централизованное управление и милитаризованная экономика, а новая, рыночная, динамичная экономика, ориентированная на человека и способная благодаря своей мобильности и высокотехнологичному уровню отвечать на различные вызовы внутреннего и мирового развития.

Поэтому угрозами для такого объекта экономической безопасности России выступают угрозы не нынешнему, преимущественно отсталому промышленному потенциалу, а направлениям его коренной замены, развертыванию инвестиционно-инновационных процессов. В связи с этим особую значимость приобретает широкая реконструкция промышленного потенциала, т. е. создание и реализация нового технического базиса. Как показывает мировой и отечественный опыт, успех

централизованно управляемых процессов осуществления широких технологических преобразований существенно зависит от решений лиц, облеченных властью, а цена ошибок при использовании этих форм слишком высока. Более эффективным является путь децентрализованный, основанный на конкурентной борьбе и инновациях, одобренных рынком. Однако это не означает устранения государства из самого инвестиционно-инновационного процесса, так как значение государственных участия и воздействия здесь предельно высоко. При этом государство должно заниматься не выделением больших бюджетных вложений под централизованно назначенные технологические приоритеты, а созданием экономических предпосылок для эффективной реализации инвестиционно-инновационных процессов, т. е. должно осуществлять хозяйственную стабилизацию, подавлять инфляцию, а также поощрять малый и средний наукоемкий бизнес и поддерживать в финансовом плане НИОКР.

Экономическая безопасность должна рассматриваться как качественная характеристика экономической системы, определяющая ее способность поддерживать соответствующие условия жизнедеятельности населения, устойчивое обеспечение ресурсами, а также последовательную реализацию государственных интересов России. Это особенно необходимо в условиях кризисной фазы развития, когда во многом деформируются факторы и критерии безопасности и вместе с тем дополнительно отягощаются механизмы поддержания стабильности, сужаются возможности разработки и реализации программы экономической стабилизации. Значимость макроэкономических аспектов экономической безопасности заметно повышается также и в условиях крупных национально-государственных преобразований, затронувших в последние несколько лет Россию как внутри ее, так и вовне.

В условиях кризисных и крупномасштабных переходных процессов механизмы стабилизации и обеспечения экономической безопасности представляют собой достаточно противоречивую систему (пример — взаимоотношения России со странами СНГ, когда факторы ее политической и национально-этнической стабильности и безопасности долгое время компенсировались огромными экономическими издержками, размеры которых становились фактором экономической дестабилизации и некомпенсируемых потерь национального хозяйственного и природного потенциала). Поэтому противоречивость многих аспектов экономической безопасности будет существовать еще длительное время и для устранения ее потребуются определенные усилия. В качестве примера можно привести противоречия, касающиеся первоочередного поддержания пороговых значений в области потребления, а также минимально необходимых масштабов инвестиционно-инновационной деятельности.

Важной составной частью характеристики экономической безопасности на макроуровне являются принятые ее основные критерии. В частности, принятие в качестве основного критерия лишь достижения устойчивого, динамичного и эффективного развития экономики с первоочередным решением задач повышения качества жизни населения страны не вполне отвечает реалиям сегодняшнего дня. Например, в условиях глубокого кризиса и разнообразия переходных процессов критерием может быть минимум ущерба, наносимого обществу, экономике, отдельному индивидууму. Вариант такого подхода — принятие в качестве основного критерия критического или порогового состояния социально-экономической системы, за пределами которого возникает угроза или происходят деградация системы и ее разрушение. Для определения таких пороговых значений необходимо: рассмотреть основные условия функционирования экономической системы и выделить наиболее важные показатели, их характеризующие; определить факторы дестабилизации системы; оценить возможности наступления различных по характеру и последствиям критических ситуаций; выявить пути поддержания стабильности.

Решение этих задач требует теоретического обоснования и разработки целого ряда новых категорий и показателей, позволяющих описывать и анализировать базисные тенденции экономической безопасности России и пути ее обеспечения. Основой их формирования является тесная взаимосвязь понятия безопасности с категорией риска. Долгое время (особенно на макроуровне) развитие экономики рассматривалось как детерминированный процесс, при котором в неполной степени учитывались непредсказуемость результатов хозяйственных решений, негативные последствия тех или иных нарушений воспроизводственного процесса, т. е., по существу, факторы экономического риска. Использование категорий риска позволяет значительно повысить эффективность управления, особенно в случае, когда на смену административно-командным методам хозяйствования приходит система рыночных взаимосвязей в экономике и происходит децентрализация управления хозяйственными и социальными процессами. Концепция риска в стратегии экономической безопасности включает в себя такие элементы, как оценка риска и управление им. При этом оценка риска носит, как правило, экспертный, вероятностный характер в силу неопределенности многих негативных последствий действия объективных факторов и принимаемых хозяйственных решений. Сегодня можно утверждать, что переживающая кризис российская экономика обладала минимумом внутренней устойчивости, в результате чего многие факторы риска могли создать в ней критическую ситуацию. Управление риском предполагает предвидение возможных критических социально-экономических ситуаций с тем, чтобы предотвратить, ослабить и смягчить их последствия. Поэтому наряду с оценкой вероятности появления той или иной критической ситуации необходима и оценка потерь (ущерба), сопровождающих их возникновение. В связи с этим оценка уровня экономической безопасности предполагает наряду с анализом факторов риска также учет категорий потерь (ущерба) — фактических, ожидаемых, компенсируемых и некомпенсируемых.

В зависимости от характера возникающих потерь и наличия ресурсов, необходимых для их возмещения,

негативные последствия факторов риска и связанных с ними критических социально-экономических ситуаций могут проявляться на локальном уровне (в пределах отдельных территорий, групп населения, предприятий), мезоуровне (в пределах субъектов Федерации и секторов народного хозяйства), общенациональном и транснациональном (глобальном) уровнях. Однако на всех уровнях можно отчетливо проследить наличие критических социально-экономических ситуаций, а локальные и региональные критические ситуации при определенной частоте повторяемости сами по себе начинают формировать проблему безопасности на макроуровне.

Экономическая безопасность выделяет такие категории, как компенсационные ресурсы и компенсационный потенциал, между которыми существуют определенные различия. Компенсационные ресурсы как более узкое понятие близки по своему значению к традиционному страховому, резервному запасу. Они сочетаются с понятием потерь или ущерба (ожидаемого, фактического), который в каждом конкретном случае ограничен определенными значениями. Компенсационный потенциал должен характеризовать общую способность экономики государства реагировать на критические ситуации, предупреждать и преодолевать их, восстанавливать стабильность и устойчивость процессов хозяйственного, социального и экологического характера в случае их нарушения в определенном секторе народного хозяйства, в регионе. Условно эти показатели могут использоваться для оценивания текущего состояния экономического, социального и экологического потенциалов и происходящих кратко- и среднесрочных процессов; выявления и ранжирования долговременных факторов дестабилизации и определения их пороговых значений; установления величины наличных потенциалов предупреждения и компенсации потерь (ущерба).

К показателям, характеризующим текущие и среднесрочные аспекты экономической деятельности и социального развития страны, относятся: экономический рост; характеристика природно-ресурсных, производственных и научно-технических потенциалов; дефицит консолидированного бюджета; действие внешнеэкономических факторов; стабильность национальной валюты; внутренняя и внешняя задолженности.

В нашей стране спад промышленного производства начался около 1990 г. Он был связан в основном с кардинальным изменением структуры конечного спроса (причины — резкое сокращение военных расходов, свертывание государственных программ, прежде всего инвестиционного и инновационного характера, а также уменьшение дотаций и субсидий отраслям народного хозяйства). Однако в нынешнем виде изменение структуры конечного спроса не может быть охарактеризовано как позитивный аспект падения объемов производства. Структурный кризис потенциально затронул наиболее эффективные наукоемкие отрасли, так, наиболее существенным было снижение выпуска наукоемкой промышленной продукции, особенно инвестиционно-инновационной направленности.

Наблюдалось явное снижение уровня жизни основной массы населения страны. Некоторое повышение денежных доходов населения в 1993 ÷ 1994 гг. было излишне оптимистично расценено многими экспертами как начало процесса социальной стабилизации. На самом деле в денежных доходах населения стабильно повышается доля "предпринимательских доходов", что неизбежно генерирует дальнейший рост всех показателей экономической дифференциации в обществе. Очевидно, что в переходный период развития страны, отягощенный условиями кризисного состояния экономики, кризисными процессами в социальной сфере, в сфере природопользования и т. д., нельзя не отслеживать взаимосвязь между масштабами и скоростью осуществляемых преобразований и возникновением опасных тенденций в социально-экономическом развитии. Поэтому в распоряжении правительства постоянно должен быть инструментарий отслеживания и анализа потенциальных и реальных угроз экономической безопасности, позволяющий находить компромисс в условиях противоречия интересов развития общества, его отдельных социальных групп, регионов, отраслей народного хозяйства.

Долговременные факторы риска применительно к конкретной экономической системе подразделяются на внешние и внутренние. К внешним относятся геополитические внешнеэкономические и глобальные экологические процессы. Внутренние факторы связаны с закономерностями циклического развития экономической системы и внеэкономическими явлениями (например, преобразование национально-государственных структур страны). Масштабы и устойчивость действия этих факторов приводят к выводу, что они при определенных условиях могут иметь негативные последствия на макроэкономическом уровне и составить реальную угрозу экономической безопасности.

Среди внешних факторов следует отметить возрастание значимости экономических и межгосударственных отношений со странами СНГ, утрату значительной части ранее существовавших внешних рынков.

Действие внутренних долговременных факторов экономической нестабильности, не связанных с циклическими закономерностями развития производства, вызвано последовательным накоплением длительных разрушительных тенденций в условиях воспроизводства ключевых элементов хозяйственной системы (эффективное использование производственного, инвестиционного, инновационного и научно-технического потенциалов; экономические отношения хозяйствования, социальная сфера; состояние окружающей среды; система федеральных отношений и региональная экономика).

Отмеченные выше процессы выступают самостоятельными факторами риска, способными их генерировать, они различны по характеру, но весьма сходны по реальности потенциального экономического и социального ущерба на макроуровне. Одновременные анализ и оценка долговременных факторов риска позволяют сделать ряд выводов. Один из них состоит в том, что существенно важные факторы дестабилизации чаще

проявляются не в тех или иных количественных показателях, а в негативном характере долговременно складывающихся тенденций. При этом весьма часто определяющее значение для экономической безопасности и политики ее поддержания имеет даже не глубина какой-либо из названных тенденций, а ее характер и продолжительность (дискредитация образования, научной деятельности, криминализация различных сфер хозяйствования и др.).

Количественные показатели, характеризующие многие из названных выше долговременных экономических и социальных процессов или тенденций, реально близки к их экспертно выявляемым пороговым значениям, которые должны быть определены как качественно, так и количественно в соответствии со специфическими условиями хозяйственного, социально-политического и экономического развития страны. При этом пороговые уровни снижения безопасности должны отражать: предельно допустимый уровень снижения экономической активности, объемов производства, инвестирования и финансирования, за пределами которого невозможны самостоятельное экономическое развитие страны на технически современном конкурентоспособном уровне, поддержание оборонного, научно-технического, инновационного, инвестиционного и квалификационного потенциала; предельно допустимое снижение уровня и качества жизни основной массы населения, за границами которого возникает опасность неконтролируемых социальных, трудовых, межнациональных и других конфликтов; предельно допустимый уровень снижения затрат на поддержание и воспроизводство природного потенциала, за пределами которого возникает опасность утраты жизненно важных ресурсных источников экономического роста.

Не вызывает сомнения и то, что пороговые значения устойчивости для различных макроэкономических процессов должны эволюционизироваться, постоянно отслеживаться и уточняться. Однако уже сейчас можно обозначить ряд предельных значений социально-экономических показателей, снижение которых наносит ущерб долговременным интересам экономической безопасности страны и тем самым лишает прогрессивно ориентированные реформы всякого смысла. Таким пороговым значением должен быть прежде всего минимальный уровень потребления, например показатель прожиточного минимума, который может быть рассчитан путем суммирования стоимости минимального набора товаров и услуг или должен составлять 40 ÷ 60 % от среднего уровня дохода. В качестве пороговых ориентиров можно предложить также среднюю обеспеченность жильем, материально-бытовыми услугами, услугами образования и здравоохранения. В то же время следует учитывать особенности кризисного переходного периода в экономике, когда возможна социально-психологическая ориентация на временное снижение пороговых значений уровня жизни, не приемлемая в условиях стабильного развития. Однако в этом случае необходима четко выверенная стратегия, реально обеспечивающая выход из кризиса и компенсацию уровня жизни населения в ближайшие два—три года.

В качестве особо важной задачи следует также обозначить преодоление долговременной тенденции "эрозии" научно-технического потенциала России. Деградация инвестиционно-инновационного процесса может обрести все симптомы критической ситуации и рассматриваться как одна из наиболее серьезных угроз экономической безопасности. По многочисленным экспертным оценкам, значительная доля еще появляющихся сегодня технических новинок представляет собой повторение ранее сделанного и, соответственно, не конкурентоспособна не только на мировом, но часто и на внутреннем рынке. Из-за невозможности нормального воспроизводства и реализации научных заделов и фундаментальных идей в России сложились предпосылки для масштабного оттока высококвалифицированных специалистов из сферы науки. Поэтому необходима активная государственная политика предотвращения необратимого разрушения ядра научно-технического потенциала, что требует обеспечения его финансирования, проведения реорганизации и ориентирования на стабилизацию и последующее развитие экономики. Следует отметить прогнозируемое сужение природно-ресурсной базы, что может создать угрозу вытеснения России с мировых рынков. Наблюдаемое снижение темпов геолого-разведочных работ привело к тому, что в настоящее время сократились объемы прироста разведанных запасов полезных ископаемых страны, а добыча многих из них превышает этот прирост, что ведет к снижению обеспеченности многими природными ресурсами. Деградирует также и производственный потенциал страны. Так, степень износа основных производственных фондов приблизилась к 60 %, а в некоторых отраслях она еще выше. В связи с этим в ближайшие годы страна может целиком потерять отдельные отрасли народного хозяйства. Признавая уникальную возможность в настоящее время избавиться от избыточных мощностей, воплощающих ресурсоемкие и экологически грязные технологии, следует поставить вопрос о предельно допустимых границах данного процесса, о передаче части мощностей в другие секторы (сферы образования, услуг, малого и среднего предпринимательства, жилищного строительства и др.).

Не меняется к лучшему и экологическая ситуация в стране, так как из-за изношенности производственных фондов и часто вынужденной экономии предприятий на природоохранных затратах и технологиях снижение объемов выпуска продукции практически не сопровождается адекватным ослаблением всех форм загрязнения природной среды. Значительная часть населения страны по-прежнему проживает в регионах экологического бедствия и повышенного экологического риска. Остро стоит вопрос снабжения населения чистой питьевой водой: некоторая часть населения России вынуждена использовать для питья воду, порой не соответствующую санитарно-гигиеническим требованиям. Загрязнение атмосферного воздуха также остается важной экологической проблемой. Учитывая, что экологический фактор обусловливает до 30 % заболеваемости населения страны, а также другие негативные тенденции в плане соответствия здоровья и трудоспособности на-

селения, можно сделать вывод, что экологическая ситуация в России характеризуется наличием негативных явлений, объем которых иногда превышает критические пороговые значения, что представляет собой уже реальную угрозу национальной безопасности.

Наиболее опасным является разрушение "человеческого" ресурса, причем именно как макроэкономического фактора. Можно, например, обратить внимание на процесс квалификационной деградации: в промышленности России осталось около 1 млн рабочих высшей квалификации, или примерно 2 % от общего их числа, тогда как в США они составляют около 40 %. Значительную угрозу социально-экономической стабильности представляет рост безработицы, особенно в условиях отсутствия традиций и институтов экономической и социально-психологической адаптации и помощи населению в подобной ситуации. Официальный уровень безработицы не превышает 1,7 %. Однако при расчетах по методологии МОТ потенциал безработицы находится на уровне 12 % экономически активного населения. По имеющимся расчетам, безработица может возрасти до 14 ÷ 16 % (с учетом ее скрытых форм), что уже превышает пороговые значения социально-экономической стабильности и относительной устойчивости рынков труда.

Кроме того, Россия вступила в полосу формирования негативных тенденций воспроизводства населения. Понизился суммарный коэффициент рождаемости, определив тем самым на длительную перспективу сохранение тенденции сокращения численности населения. Интенсифицировались процессы депопуляции именно среди русского населения, наблюдается общее старение населения. Поэтому демографический фактор в ближайшие десятилетия будет оказывать дестабилизирующее воздействие на экономику, социальную сферу и возможности решения, других вопросов обеспечения национальной безопасности. Социально-экономический кризис изменил картину здоровья населения и круг определяющих его факторов (туберкулез, венерические болезни, психические расстройства, алкоголизм, наркомания, убийства и самоубийства). В связи с этим меняется структура инвалидности и смертности. Многие процессы, касающиеся состояния здоровья населения, развиваются хуже, чем предполагалось самыми пессимистическими прогнозами, прежде всего из-за причин социального характера. При анализе подобной ситуации путь радикального решения проблемы обязательно лежит через процессы социального оздоровления. Еще один момент, отражающий негативные процессы в обществе и экономике, — рост экономической преступности, который во многом определяет и общий высокий уровень преступности в стране. Криминализация экономики выступает существенным тормозом укрепления российской государственности и стабилизации экономики и социальной сферы.

Предлагаемая концепция поддержания экономической безопасности России исходит из того, что в сложившихся трудных хозяйственных и социально-политических условиях одновременно существенно уменьшить воздействие всех факторов риска методами оперативного управления этим затруднительно. В связи с этим цель мониторинга всех факторов риска и оценки соответствующей системы показателей видится в том, чтобы провести ранжирование факторов риска с точки зрения их потенциального воздействия на устойчивость национальной экономики и социально-политическую стабильность в обществе. Экспертные прогнозы издержек, необходимых для возмещения ущерба от тех или иных критических ситуаций, дают возможность оценить и своевременно сформировать ресурсы общества, ориентированные на восстановление и обретение стабильности и устойчивости социально-экономического развития. В этих целях концепцией экономической безопасности вводятся принципиально новые для нашей системы экономического анализа, расчетов и информации показатели — компенсационные ресурсы (потенциал прямых компенсаций) и общий компенсационный потенциал в качестве, прежде всего, потенциала предупреждения потерь (ущерба). При этом компенсационные ресурсы, как и компенсационный потенциал в целом, могут быть охарактеризованы рядом количественных и качественных показателей, формирующих важные пороговые значения для оценки степени экономической безопасности государства. Этим как бы определяется, что соответствие достаточно обоснованных оценок системы рисков потенциалу прямых компенсаций и предупреждения ущерба является одним из важных индикаторов экономической безопасности страны.

Потенциал прямых компенсаций включает материальные запасы и резервы производственного и непроизводственного характера; специальные запасы и резервы, их территориальное размещение; дополнительные транспортные возможности для доставки материальных ресурсов в места локализации критических ситуаций; резервные мощности, особенно в энергетических отраслях, а также технические средства для проведения крупных восстановительных работ, поддержания резервных возможностей оказания социальной помощи. При этом потенциал компенсаций характеризуется такими показателями, как финансовые резервы, системы страхования, возможности благотворительных фондов, развитие компенсационной функции и мобильность систем здравоохранения, возможности мобильной переподготовки кадров и др. При этом следует иметь в виду преимущественное значение качественных (прежде всего структурных) аспектов категорий компенсационных ресурсов и компенсационного потенциала в условиях происходящих в экономике России наращивания объема незадействованных (простаивающих) производственных мощностей, а также роста отдельных видов материальных запасов.

Известно, что в ситуации, когда сворачиваются одни отрасли производства и "на износ" работают другие, экономика страны, столкнувшись с нарастанием критических ситуаций, утрачивает как специальные компенсационные ресурсы, так и общий компенсационный потенциал народного хозяйства. В связи с этим потенциал предупреждения ущерба формируется прежде всего за счет возможностей, предоставляемых структурной, технологической и организационной пе-

рестройкой народного хозяйства, совершенствования хозяйственно-экономического механизма отношений собственности, развития систем государственного отраслевого и территориального управления и др. К числу этих факторов можно отнести также совершенствование правового и экономического механизмов федеративных отношений, обоснованное разграничение функций и ответственности органов власти и управления Федерации и ее субъектов.

Варианты обеспечения экономической безопасности — это определение при сопоставлении в каждом конкретном случае мер предупредительного и компенсационного характера по критерию "минимум ущерба" или "минимум совокупных потерь и затрат", хотя отсутствие целостной концепции экономической безопасности России, равно как и ограниченность фактического и статистического материала по данной проблематике, не позволяют провести целостный количественный и качественный анализ потенциала компенсации и предупреждения ущерба. Поэтому аналогичная работа может проводиться в рамках таких процессов, как экономическое и правовое закрепление федеральной собственности, собственности субъектов Федерации и муниципальной собственности; перестройка финансово-бюджетного процесса (локализация на различных уровнях бюджетных и внебюджетных фондов; создание системы комплексной социальной защиты населения; формирование нового экономического механизма природопользования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Клячко Л. М., Степанов А. Е.** Объект и элементы концепции экономической безопасности // Биржа интеллектуальной собственности. 2005. № 7. С. 1—12.
2. **Клячко Л. М., Степанов А. Е.** Методические подходы к выявлению продукции, имеющей стратегическое значение для обеспечения экономической безопасности // Биржа интеллектуальной собственности. 2005. № 8. С. 1—7.
3. **Корнеев В. Т. Саламатина Н. И.** Процветание и безопасность // Московский ритм. 2004. № 27.
4. **Концепция** национальной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 17.12.1997 № 1300, в ред. Указа Президента РФ от 10.01.2000 № 24).
5. **Промышленная** политика в современных условиях: инновации, инвестиции, интеграция (отечественный и зарубежный опыт) / Под общ. ред. Л. М. Клячко, А. Е. Степанова. М.: Мобильная полиграфия. 2006. 375 с.
6. **Елагин Ю. П.** Понятие "безопасность". М.: Атомная энергия. Т. 80. Вып. 6. С. 415—420.


---

УДК 657.631.6

А. М. КАРМИНСКИЙ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

# Методические вопросы построения конструктора динамических рейтингов

В силу важности рейтингов как инструмента мониторинга внешней среды разрабатывается конструктор динамических рейтингов (КДР), основной особенностью которого помимо включения динамической составляющей является перестраиваемость и адаптивность по отношению к системе ключевых показателей. Проведено обоснование методологии динамического рейтингования, предусматривающей учет внутренних и внешних факторов с использованием исторической составляющей и непараметрических методов оценки компонентов. Разработан КДР для сравнительной оценки хозяйствующих субъектов. Сформированы рейтинговые шкалы и система рейтингов динамической финансовой стабильности.

Контроллинг внешней среды представляет важный компонент информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений [1]. Именно путем адекватного оценивания и качественного прогнозирования окружения, прежде всего контрагентов (партнеров, клиентов, поставщиков, конкурентов), можно оценить подверженность предприятий воздействию внешней среды и в конечном счете управлять их устойчивым развитием.

В силу важности рейтингов как инструмента мониторинга внешней среды далее разрабатывается конструктор динамических рейтингов, основной особенностью которого помимо включения динамической составляющей является перестраиваемость и адаптивность по отношению к системе ключевых показателей.

### Разработка конструктора динамических рейтингов

Рейтинги являются высокотехнологичным продуктом, который требует оценки не только внутреннего состояния и тенденций развития самого субъекта, но и положения субъекта в соответствующем секторе экономики, его зависимости от возможных изменений внешних макроэкономических факторов, которые непосредственно влияют на ситуацию как внутри страны, так и за се пределами [2, 3].

Концептуально задача построения конструктора динамического рейтинга (КДР) состоит в том, чтобы объединить анализ состояния субъекта по внешним и внутренним показателям с апостериорными результатами его деятельности, в том числе рыночными. В предложенном подходе обеспечены учет изменений конъюнктуры и историчность оценок благодаря анализу результатов деятельности в течение периода наблюдения. Предложенная система рейтингов поддержана технологически и обеспечивает постоянную и обновляемую оценку хозяйствующих субъектов в сфере производства товаров и услуг.

Основной объем информации, необходимой для рейтинговой классификации, поступает благодаря обработке и анализу доступных форм отчетности (например, финансовой) как основы для формирования показателей, которые характеризуют

текущее состояние субъекта и тенденции их изменения. Система отчетности позволяет также сформировать представление об уровне и характере отношений данного субъекта с другими хозяйствующими субъектами, с которыми он связан в процессе своей деятельности. Для оценки состояния субъекта важно определить не только его масштаб, сбалансированность оценок, силу и слабость применяемых технологий и возможность роста, но также его зависимость от хозяйственных связей с другими участниками рынка и макроэкономической среды.

Концепция КДР включает следующие основные компоненты:

1. Внутреннее состояние хозяйствующего субъекта определяется на основе анализа показателей, построенных путем группировки и расчета по регулярной и доступной внутренней отчетности (внутренний рейтинг).

2. Положение данного субъекта по отношению к другим участникам экономической деятельности в профессиональном и/или региональном срезе определяется путем анализа доли основных показателей субъекта в системе данного сектора рынка (внешний рейтинг).

3. Совместная оценка внутреннего состояния субъекта и его внешнего положения в экономической системе представляет собой динамический рейтинг (ДР).

Особенностями конструктора ДР являются:

определение динамики и тенденций изменения состояния субъекта путем расчета и анализа показателей за целый ряд отчетных дат, которые охватывают период времени, достаточный для анализа ситуации и принятия решений;

учет снижения значимости более старых показателей при анализе динамики проводится за счет снижения их влияния на текущее состояние и положение субъекта, т. е. реализуется постепенное (частичное) "забывание" более старых значений;

анализ динамики доли субъекта в системе предполагает полноту информации, т. е. формирование и использование баз данных, которые охватывают все субъекты данного сектора экономики.

Таким образом, в КДР внешние показатели характеризуют степень успешности деятельности субъекта относительно других участников данного сектора экономики (конкурентов). Внутренние показатели характеризуют не только сбалансированность собственной деятельности субъекта, но и его отношения с поставщиками и потребителями, т. е. партнерами по технологической цепочке.

В отличие от других методик КДР полностью прозрачен и его результаты могут быть воспроизведены другими участниками информационного рынка, которые располагают соответствующими информационными ресурсами (базами данных). При этом учитываются динамика, внутренняя стабильность и внешние результаты деятельности субъекта, которые выражаются в изменении его положения на рынке на регулярной основе и определяются дистанционно.

Основой объективной оценки являются системный мониторинг отчетности и расчет показателей, которые отражают состояние и динамику изменений потоков денежных (материальных) средств. Существенным фактором является степень непрерывности динамических рядов при изменении формы отчетности. Например, таким изменением станет предстоящий переход на МСФО. При этом хорошим фундаментом для формирования дистанционных рейтингов является мониторинг показателей в рамках информационно-аналитической системы (примерами являются информационно-аналитическая система "Банки и финансы" информационного агентства "Мобиле" [3], система СПАРК агентства "Интерфакс").

КДР базируется на комплексной оценке деятельности предприятия. Конструктор в определенной мере обобщает основные положения методики дистанционного построения ДР, которые были реализованы при разработке рейтинга динамической финансовой стабильности [3, 4]. Особенность КДР состоит в том, что расчеты по публичной отчетности охватывают все предприятия отрасли (некоторой экономической подсистемы, бизнес-группы предприятий) с постоянной периодичностью (далее для определенности — помесячной на протяжении года), а оценка осуществляется как по внутренним факторам, так и по динамике положения (доли) предприятия в бизнес-группе.

Периодичность расчета и предоставления таких рейтингов зависит от периодичности поступления отчетности и потребности в обновлении рейтинга. Уровень детализации представления результатов зависит от запроса потребителей данных информационных продуктов. Результаты могут быть представлены в виде: списка по убыванию итогового рейтинга; разбиения компаний по группам, как это принято в традиционных рейтингах; подробных рейтинговых отчетов по отдельным субъектам экономики или группам субъектов, сформированным по отраслевому, территориальному или иному признаку.

Необходимым свойством КДР является полнота — все хозяйствующие субъекты выделенной группы (например, все действующие российские банки) получают рейтинг. Кроме этого, для многих приложений можно ожидать периодичности оценок, что позволяет отслеживать динамику и тенденции изменений рейтингов. Кумулятивность методики обеспечивает возможность оценки сформированных по определенным признакам групп субъектов, например, городов, регионов, федеральных округов и т. д. Важными отличиями КДР являются открытость методики, прозрачность, периодичность обновления, дистанционность. Принцип построения конструктора предусматривает расчет ДР стабильности групп компаний, выделенных по территориальному, отраслевому или иному признаку.

Оценка КДР может проводиться на регулярной основе в автоматическом режиме по мере поступления отчетности в три этапа:

1. Определение внешнего рейтинга. Расчет составляющей ДР субъекта по выбранным внешним показателям на все отчетные даты в течение периода наблюдения (далее для определенности — года) обеспечивает оценку доли субъекта по каждому показателю в сумме значений

данного показателя по всем однородным компаниям. Для каждого внешнего показателя проводится расчет суммы долей по всем датам с приоритетом более свежих результатов (с линейным уменьшением влияния более старых результатов). Затем полученные значения для всех внешних показателей суммируются в один показатель и нормируются. В результате получается ДР субъекта по внешним показателям — внешний рейтинг.

2. Определение внутреннего рейтинга. Расчет и анализ внутренних показателей, характеризующих предприятие (например, его финансовую стабильность: коэффициентов ликвидности, качества активов, качества пассивов, доли просроченной задолженности и т. д.). Полученные значения оцениваются в баллах по месяцам в течение года, с последующим суммированием, взвешиванием и введением временнóго сглаживания ("забыванием"). Получается рейтинг динамической стабильности субъекта по внутренним показателям — внутренний рейтинг.

3. Определение интегрального динамического рейтинга, являющегося сверткой совокупности внешних и внутренних показателей, например с использованием обобщенных показателей [2].

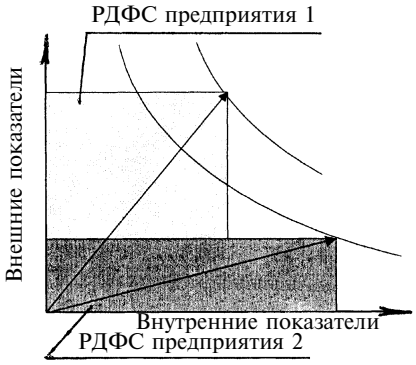
Учет динамики изменения показателей на протяжении годового периода осуществляется следующим образом. Расчет всех внешних и внутренних показателей проводится суммированием (сверткой) по всем отчетным датам (пример приведен по месяцам годового периода, $T = 12$) с линейным пропорциональным "забыванием" более старых значений (использованием скользящего цифрового фильтра в виде убывающего во времени окна) и с нормированием суммы весов до единицы по формуле

$$D(P^k) = \frac{2}{13} \sum_{t=1}^{12} \frac{t}{12} \frac{P_t^k}{\sum_{j=1}^{N} P_t^j},$$

где $D(P^k)$ — долевой ДР по данному показателю; $P^k$ — один из выбранных внешних (или внутренних) показателей для $k$-го субъекта (предприятия), $k = 1, ..., N$; $P_t^k$ — один из выбранных показателей для $k$-го субъекта в момент времени $t$; $N$ — общее число хозяйствующих субъектов (в частности, банков) в рассматриваемой группе; $t$ — время, $t = 1, ..., T$; $T = 12$. Текущему моменту времени соответствует $t = 12$, предыдущим моментам — месяцы в обратном отсчете.

В качестве ДР можно использовать средневзвешенное геометрическое внешнего и внутреннего рейтингов (или любую другую агрегирующую эти показатели функцию, представляющую собой обобщенный показатель). Значение такого показателя можно интерпретировать как площадь прямоугольника, определяемого точкой, характеризующей предприятие на условной плоскости в координатах "внутренняя стабильность — положение в бизнес-группе" по результатам его деятельности за прошедший год. Вектор с координатами внешнего и внутреннего рейтингов определяет ту гиперболу равноустойчивости (стабильности), которой соответствует предприятие по своему функциональному состоянию и положению в системе с учетом истории его деятельности в течение прошедшего периода (рисунок).

Классификация поведения субъектов оценки достаточно сильно зависит от их размера. В соответствии с масштабами деятельности субъекты можно разделить на четыре группы ($X$, $L$, $M$, $S$). В качестве критерия разделения на группы можно использовать один из размерных показателей, например сумму пассивов. Группы могут быть выделены в зависимости от доли в объеме продукции рассматриваемой отраслевой подсистемы. Они могут быть сформированы следующим образом:




**Пример представления рейтинга динамической финансовой стабильности двух предприятий**

группа $X$ (крупнейшие) — крупнейшие предприятия бизнес-группы, на которые приходится 70 % суммарного объемного показателя;

группа $L$ (крупные) — самые крупные из оставшихся предприятий, на которые приходится в совокупности 15 % объема;

группа $M$ (средние) — следующие по величине предприятия, на которые приходится в совокупности 10 % объема;

группа $S$ (малые) — оставшиеся предприятия, на которые приходится 5 % объема.

### Рейтинг динамической финансовой стабильности

Рассмотрим понятия внешних и внутренних показателей применительно к формированию рейтинга динамической финансовой стабильности (РДФС) с использованием предложенного конструктора, рассчитанные на основе данных финансовой отчетности. Внешние показатели характеризуют динамику долей субъекта в системе однородных компаний по совокупности основных показателей, т. е. они отражают результаты его деятельности в течение предшествующего года, выявляя изменение положения в рассматриваемой экономической подсистеме. Внутренние показатели характеризуют пропорции между различными сторонами деятельности (например, привлеченными, размещенными и собственными средствами), которые определяют уровень способности субъекта своевременно выполнять обязательства, т. е. характеризуют качество его деятельности в течение года. Качество, характеризуемое рейтингом (например, стабильность), определяется по его состоянию на текущую отчетную дату с учетом динамики изменения состояния. При выборе показателей для расчета внешнего рейтинга первым шагом является регулярный расчет доли каждого субъекта в суммарных показателях.

Важная особенность методики состоит в том, что используются изменения долей. Это позволяет выделить показатели, по которым в силу тех или иных причин резко снизились объемы операций. Вместе с тем можно всегда получить результаты расчета каждого показателя на каждую отчетную дату и по ним уточнить характер возникающих проблем. Для каждого показателя значения долей суммируются. Динамический рейтинг внешних показателей субъекта характеризует его положение в системе.

Вторым шагом подготовки ДР является расчет для каждого субъекта относительных внутренних показателей. Такие показатели выбираются из системных принципов с тем, чтобы охарактеризовать основные стороны деятельности предприятия (например, для финансовых институтов показатели могут быть выбраны из числа используемых в методике CAMEL, считающейся классической в США). Выбор внутренних показателей в виде относительных показателей проводится в сетевой модели компании.

Выбор показателей предусматривает охват всех существенных и критичных для устойчивости сторон деятельности субъекта. В частности, для выбора показателей могут быть использованы методы, близкие к методам формирования ключевых показателей эффективности. Сетевая модель хозяйствующего субъекта позволяет определить наибольшее число значимых показателей, которые оказывают или могут оказать влияние на состояние субъекта. Чем стабильнее макроэкономическая ситуация, тем меньшее число факторов оказывает влияние на состояние субъекта.

Внутренние показатели рассчитываются периодически (по месяцам, кварталам) в течение года. Затем формируется балльная оценка внутренних показателей по отношению к субъектам данной группы однородных субъектов. Значение каждого показателя оценивается с использованием выборочной функции распределения внутри группы. Для этого все субъекты упорядочиваются по убыванию качества и определяются нормированные суммарной оценкой значения. Баллы определяются отнесением упорядоченного значения, соответствующего субъекту, к диапазону, генерируемому квантилями, соответствующими равномерному разбиению вероятностной шкалы в интервале [0, 1]. Суммарный балл по внутренним показателям оценивает состояние субъекта по сравнению с другими в данной группе. Этот суммарный балл и задает его внутренний рейтинг.

Оценка относительных показателей проводится в следующем порядке.

1. На основании балансов субъектов периодически (далее — по месяцам в течение года) определяются взвешенные (с "забыванием") показатели деятельности субъекта (по каждой из $K$ компаний соответствующей группы в отдельности). Полученные значения для $j$-го внутреннего показателя $i$-го субъекта обозначаются через $A_{ij}$, где $j = 1, ..., N$; $i = 1, ..., K$.

2. Для каждого $j$-го показателя формируется набор нормированных суммой значений показателей (относительные индексы $\tilde{A}_{ij}$), их совокупность упорядочивается по убыванию (возрастанию) от лучших значений к худшим. С полученным набором связываем статистическую функцию распределения случайной величины:

$$\xi_{mj} = \sum_{i=1}^{m} \tilde{A}_{ij}.$$

3. Число наблюдаемых значений такой случайной величины совпадает с числом субъектов в группе (группе масштабности).

По выборочной функции распределения для каждого показателя $j$ строим квантили уровней $q^j_{l/R}$, где $R$ — число равномерных градаций в интервале [0, 1], а $l$ — номер интервала. Эти квантили делят интервал на $R$ частей, которые определяются как

$$D^j_1 = [0, q^j_{1/R}),\ D^j_2 = [q^j_{1/R}, q^j_{2/R}],$$
$$..., D^j_R = (q^j_{(R-1)/R}, 1].$$

4. Для каждого субъекта $i$ внутри выбранной группы балльную рейтинговую оценку формируем в зависимости от попадания выборочного значения для соответствующего показателя $\xi_{ij}$ в один из приведенных выше диапазонов:

если $\xi_{ij} < q^j_{1/R}$, субъект получает 0 баллов;

если $q^j_{(R-2)/R} \leqslant \xi_{ij} \leqslant q^j_{(R-1)/R}$, субъект получает $R - 2$ балла;

если $q^j_{(R-2)/R} < \xi_{ij}$, субъект получает $R - 1$ балл.

Баллы показывают положение данного субъекта среди всех субъектов, входящих в соответствующую группу. Суммы значений показателей задают принадлежность субъекта к одной из подгрупп надежности в каждой из групп масштабности.

Внешний рейтинг определяет положение каждого субъекта в подсистеме, его расчет и значение зависят от всех компаний рассматриваемой бизнес-группы. Внутренний рейтинг определяет состояние самого субъекта по его показателям, расчет и значение внутренних показателей зависят только от самого субъекта. Вместе с тем значение внутреннего рейтинга зависит от субъектов данной группы масштабности, т. е. внутренний рейтинг рассчитывается относительно некоторого усредненного значения каждого внутреннего показателя для субъектов данной группы.

Рейтинговая шкала субъектов формируется в соответствии с расчетом значений внешнего и внутреннего рейтингов, а также с учетом динамики значений данных показателей в течение года. Шкала является отражением результатов расчета и анализа показателей деятельности субъекта на протяжении этого периода. Рейтинговая шкала реализуется отдельно для каждой группы субъектов по масштабам их деятельности. Границы между группами с течением времени могут постоянно меняться, могут происходить переходы отдельных субъектов из одной группы в другую. Субъекты делятся на классы в соответствии с последовательностью расчета внешнего (долевого) и внутреннего рейтингов (соответственно РД и РВ) субъектов с учетом динамики изменения каждого из этих рейтингов на протяжении года.

Рейтинговая шкала, которая может использоваться в конструкторе, имеет следующие особенности.

В каждой группе субъекты помещаются в один из четырех классов (категорий) по их уровню финансовой стабильности: А, Б, В, Г. Так, например, финансовая стабильность субъекта непосредственно связана с его потенциальной платежеспособностью, т. е. с тем показателем, на котором делают акцент все рейтинги. Каждый класс имеет по три подкласса (подкатегории), обозначаемые цифрами 1, 2, 3. В соответствии с оценкой динамики изменения внутренних и внешних показателей могут добавляться знаки плюс или минус, которые указывают на тенденции в изменении рейтинга.

Практическая реализация рейтинга на базе КДР была представлена в работе [4] применительно к финансовым организациям.

### Выводы

Проведено обоснование методологии динамического рейтингования, предусматривающей учет внутренних и внешних факторов с использованием исторической составляющей и непараметрических методов оценки компонентов. Разработан конструктор динамических рейтингов для сравнительной оценки хозяйствующих субъектов. Сформированы рейтинговые шкалы и система рейтингов динамической финансовой стабильности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Контроллинг:** Учебник / Под ред. А. М. Карминского и С. Г. Фалько. М.: Финансы и статистика, 2006. 336 с.
2. **Информатизация** бизнеса: концепции, технологии системы: Монография: 2-е. изд. / Под ред. А. М. Карминского. М.: Финансы и статистика, 2004. — 624 с.
3. **Карминский А. М., Пересецкий А. А., Петров А. Е.** Рейтинги в экономике: методология и практика: Монография / Под ред. А. М. Карминского. — М.: Финансы и статистика, 2005. — 240 с.
4. **Карминский А. М., Петров А. Е.** Рейтинги динамической финансовой стабильности для банков и предприятий // Контроллинг. 2004. № 3. С. 26—39.


---

УДК 658.5

К. С. БИКТЯКОВ, канд. экон. наук (МГОУ)

# Повышение адаптивности системы управления персоналом хозяйствующих субъектов

Сегодня современные экономические условия таковы, что предприятиям приходится работать в условиях постоянно меняющейся внешней среды. Поэтому процесс совершенствования системы управления персоналом должен носить непрерывный и комплексный характер с целью повышения адаптивных качеств системы управления и эффективности производства в целом.

В настоящее время многие предприятия с трудом удерживаются на уровне рентабельности в условиях обостряющейся конкуренции. Поэтому потери предприятий от неэффективного управления становятся особенно ощутимыми, а зачастую и невосполнимыми.

В последнее время руководители многих предприятий убедились в необходимости управления новыми, некомандными методами, осознанно подходя к вопросам управления. Именно это может стать основой для дальнейшего развития предприятия. На крупных предприятиях объем информации, необходимый для принятия управленческих решений, особенно велик, при этом многие составляющие являются взаимосвязанными между собой.

Эффективно осуществлять руководство предприятием, основываясь исключительно на интуиции, в настоящее время невозможно. А на быстроразвивающемся предприятии число и сложность проблем увеличиваются буквально в геометрической прогрессии. Причем эффективное управление персоналом крупного предприятия обходится дороже, поскольку в этом случае даже незначительные на первый взгляд потери из-за нерационального управления оказываются весьма существенными в силу значительных финансовых и товарных оборотов. Переработать этот объем информации можно, только используя комплексную систему управления персоналом предприятия, которая позволит своевременно реагировать на изменения внешней среды.

Одной из основных задач комплексной системы управления является упорядочение информационных потоков, предоставление оптимального доступа к данным менеджерам всех уровней для принятия эффективных управленческих решений.

Эффективно управлять персоналом — значит организовать потоки данных между службами и на основе анализа этих данных ответить на вопросы, насколько эффективно работают сотрудники предприятия и что надо сделать, чтобы повысить эффективность их работы.

Затраты на управление персоналом предприятия состоят из затрат на оплату труда управленческого аппарата и стоимости информационного обеспечения их деятельности. Кроме того, следует учитывать затраты, связанные с ошибочными управленческими решениями, и упущенные выгоды от непринятых вовремя решений. Причинами ошибочных решений и несвоевременного принятия решений, как правило, являются отсутствие или достоверной информации, или надлежащего контроля над сотрудниками, принимающими решения. Следовательно, необходимо повысить адаптивность системы управления персоналом предприятия.

Критериями качества этой системы могут быть следующие параметры:

среднее время выработки решения;

частота ошибочных решений;

средние затраты на выработку решения;

затраты, вызванные необоснованными решениями за определенный период времени;

скорость обнаружения ошибок в принимаемых решениях.

Своевременность и правильность решений обеспечивается, если вся необходимая информация поступает во все подразделения предприятия, а не собирается в отдельном подразделении. Очевидно, что адаптивная корпоративная система управления персоналом является единственно правильной формой управления, обеспечивающей выживание и развитие предприятия в острой конкурентной борьбе. Четкость поставленной задачи, которая должна решаться в результате использования новых технологий управления персоналом, является отправной точкой при оценке целесообразности затрат на их применение.

Повышение эффективности предприятия в результате внедрения адаптивной системы управления может проявляться различным образом. В качестве факторов, определяющих эффективность данного управления персоналом, можно рассматривать:

качественное улучшение подготовки решений и их реализацию;

уменьшение трудоемкости обработки данных;

экономию средств путем сокращения административно-управленческого персонала;

замену рутинной работы более интеллектуальной деятельностью персонала;

снижение роли отдельных личностей, владеющих конкретной информацией;

использование скрытых технологий, не требующих от исполнителей предоставления отчетности к определенной дате.

Все вышеперечисленные факторы лишь повышают потенциал системы управления. Даже наличие полной информации о всесторонних аспектах деятельности предприятия не является достаточным для принятия оптимальных решений. Если информация, какой бы достоверной и полной она ни была, не поддерживается принципами, целями, стимулами и идеями — всем тем, что принято называть "корпоративной философией", то вместо ожидаемого результата происходит безрезультативное освоение средств на повышение адаптивности системы управления персоналом.

Потенциальная угроза для проводимых реформ может исходить от негативного отношения со стороны управленцев, если новшества, вносимые в их работу, расходятся с их интересами.

Получение ощутимого эффекта от повышения адаптивности системы управления в значительной мере определяется способностью руководителей предприятия зародить в коллективе веру в то, что при продвижении к поставленной цели будут достигнуты цели конкретных сотрудников, поддерживающих данный процесс преобразований в системе управления. Поэтому разработку организационных основ формирования и функционирования подразделения, занимающегося совершенствованием системы управления, следует проводить силами сотрудников этого предприятия. И начинать следует с подготовки специалистов данной службы, создание которой должно вестись путем построения на основе проверенных практикой общеметодических принципов с учетом особенностей данного предприятия.

Создание такой службы и ее структурных составляющих занимает 1—2 месяца. Затем создается служба, занимающаяся подготовкой необходимой документации и схемы взаимодействия подразделений предприятия с учетом как внешних, так и внутренних факторов. В заключение будет происходить отладка работы вновь созданной службы в новых условиях.

Таким образом происходит перестройка адаптивного механизма, которая заключается в изменении целей, задач, критериев оценки деятельности всех задействованных подразделений предприятия.

Функции вновь созданной службы: анализ состояния системы управления персоналом; выявление причин снижения эффективности адаптивности управления; разработка заданий для подразделений; сбор, анализ, обработка полученной информации от подразделений предприятия; сбор, анализ, обработка информации об изменениях внешних факторов; подготовка материалов для обсуждения с менеджерами; разработка плана действий; разработка предложений по совершенствованию адаптивного механизма системы управления персоналом; внедрение предложений и оценка их эффективности.

Этапы адаптивного управления персоналом предприятия:

1. Получение информации об изменениях внешней среды.

2. Обработка полученной информации.

3. Принятие решений.

4. Передача информации соответствующим службам.

К адаптивному управлению персоналом как части управления предприятием переходят при возникновении сложных ситуаций. Его цель — своевременное устранение или снижение негативных внешних воздействий и явлений во внутренней среде предприятия. Чем быстрее реакция адаптивного управления на изменения, тем система более устойчива. Показателем результативности адаптивного механизма является рост экономической эффективности, выражающийся в тенденции к росту удельной прибыли предприятия (прибыль, отнесенная к численности персонала). Показателем работы адаптивной системы управления персоналом может быть и отношение прибыли к заработной плате, которое сопоставляет прибыль с трудовыми затратами.

Повышение адаптивности системы управления персоналом является не самоцелью, а средством устойчивой и эффективной работы хозяйствующего субъекта в целом в условиях рыночных отношений.

УДК 621.9.011:669.9

Б. Д. ДАНИЛЕНКО (Москва)

# Анализ обрабатываемости медных сплавов резанием

В большинстве имеющихся нормативов на режимы резания во многих случаях не удается найти подробные рекомендации, касающиеся механической обработки изделий из медных сплавов. Большинство рекомендаций относятся к обработке сталей и чугунов, лишь в некоторых нормативах наряду с данными по сталям и чугунам имеются рекомендации просто по "медным сплавам", в то время как разные марки медных сплавов могут сильно различаться по обрабатываемости.

Такое положение объясняется отчасти тем, что бронзы и латуни достаточно хорошо обрабатываются резанием, и поэтому разработке рекомендаций по их обработке никогда не уделялось достаточно большого внимания. Большинство технологов на основании экспертной оценки условий обработки могут даже без использования нормативных материалов достаточно точно выбрать режимы резания для углеродистых сталей, но затрудняются с выбором оптимальных режимов резания для медных сплавов. Специальные заводские нормали и рекомендации по режимам резания медных сплавов имеются только на предприятиях, которые обрабатывают такие изделия в условиях крупносерийного и массового производства.

В связи с этим определенный интерес могут представлять сравнительные данные обрабатываемости медных сплавов и хорошо известных материалов, например конструкционных углеродистых сталей, которые обычно принимаются за эталон.

Ниже приведены некоторые сравнительные коэффициенты обрабатываемости, которые можно использовать для приближенного выбора стартовых параметров режима резания для основных методов механической обработки медных сплавов.

В табл. 1 приведены наиболее используемые марки медных сплавов, разбитые на шесть групп обрабатываемости, и коэффициенты $K_{v1}$ обрабатываемости, приближенные к сплаву БрАЖ9-4 твердостью 110 ÷ 150 *НВ*, условно принятому за эталон среди сплавов на основе меди[1].

[1] Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / Под ред. Б. И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

Коэффициенты относятся к обработке материала твердосплавным инструментом в наиболее часто используемом состоянии поставки.

В табл. 2 приведены коэффициенты $K_{v2}$, характеризующие условную обрабатываемость медных сплавов эталонной группы по отношению к стали 45 твердостью 200 НВ при различных видах обработки резанием.

Коэффициент обрабатываемости по скорости резания приближенно характеризует степень повышения скорости резания при работе по медному сплаву по сравнению с обработкой стали 45, т. к. $K_{v2} = v_{м.с}/v_{45}$, где $v_{м.с}$ и $v_{45}$ — рекомендуемые скорости резания при обработке одинаковых деталей из медного сплава и из стали 45 (200 *НВ*).

Условно считается, что при работе по медному сплаву на режиме, установленному через коэффициент обрабатываемости, режущие инструменты при работе в

*Таблица 1*

| Группы сплавов | Марки сплавов | $K_{v1}$ |
|---|---|---|
| Гетерогенные сплавы | БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАМ9-2, БрОФ10-1, ЛЖМц59-1-1, ЛС59-41, Л68, Л63, Л63М | 1,0 |
| | БрАМц9-2Л, БрОФ7-02 | 0,9 |
| | БрАЖМц10-3-1, БрАЖН10-4-4, БрАЖН10-4-4-Л | 0,8 |
| | НМКЖМц30-4-2-1 | 0,7 |
| | БрБ2 | 0,6 |
| Свинцовистые сплавы при основной гетерогенной структуре | БрОС10-10, ЛМцОС58-2-2-2, БрАжС8-2-2, БрОСН10-2-3 | 1,3 |
| Гомогенные сплавы | БрА5, БрА7, БрОЦ4-3, БрОФ6,5-0,4, БрКМц3-1, БрОФ6,5-0,15 | 1,7 |
| Сплавы с содержанием свинца менее 10 % при основной структуре | БрОЦ6-6-3, БрКС3-4, БрКЦС3-15-6, БрОЦС4-4-4 | 2,2 |
| Медь | М1, М1Р, М2, М2Р, М3, М3М, М4 | 2,6 |
| Сплавы с содержанием свинца более 15 % | БрОцС4-4-17, БрОС7-17, БрМцС8-20, БрОЦ5-25 | 4,0 |

*Таблица 2*

| Вид операции | $K_{v2}$ |
|---|---|
| Продольное черновое точение твердым сплавом (ТС) | 2,7 |
| Продольное черновое точение быстрорежущей сталью (БС) | 1,7 |
| Черновое растачивание ТС | 2,8 |
| Черновое растачивание БС | 1,7 |
| Продольное чистовое точение ТС | 2,5 |
| Продольное чистовое точение БС | 1,6 |
| Сверление быстрорежущими сверлами | 2,9 |
| Сверление твердосплавными сверлами | 1,5 |
| Зенкерование ТС | 1,3 |
| Зенкерование БС | 1,2 |
| Развертывание ТС | 2,6 |
| Развертывание БС | 2,4 |
| Черновое фрезерование концевыми фрезами плоскостей и уступов ТС | 1,3 |
| Чистовое фрезерование концевыми фрезами плоскостей и уступов ТС | 1,4 |
| Черновое фрезерование концевыми фрезами плоскостей и уступов БС | 2,0 |
| Чистовое фрезерование концевыми фрезами плоскостей и уступов БС | 1,9 |
| Фрезерование угловыми, фасонными, прорезными и отрезными фрезами БС | 1,3 |

примерно одинаковых условиях будут обеспечивать нормативную стойкость инструмента. Однако следует отметить, что возникают определенные сомнения в надежности и обоснованности такой методики использования коэффициентов обрабатываемости, которые обусловлены в том числе следующими причинами:

1) для обработки медных сплавов часто используют специальные конструкции режущих инструментов или применяют стандартные инструменты с измененными геометрическими параметрами;

2) значения коэффициентов обрабатываемости будут зависеть от вида используемого инструментального материала;

3) одна и та же марка медного сплава в состоянии поставки может иметь определенный разброс значений прочностных характеристик, влияющих на выбор режима резания;

4) на значения коэффициентов обрабатываемости могут влиять конкретные условия обработки: состояние обрабатываемой поверхности, наличие охлаждения; вид, состояние и паспортные данные оборудования и др.;

5) значения коэффициентов обрабатываемости будут зависеть от вида механической обработки (точение, обработка отверстий, фрезерование и т. п.);

6) для инструментов, обрабатывающих медные сплавы, обычно используются другие критерии затупления, другие критерии отказов, другие значения нормативного периода стойкости и пр.

Поэтому использование сравнительных коэффициентов обрабатываемости может дать только ориентировочные значения рекомендуемых скоростей резания, и это нужно обязательно учитывать при выборе режимов обработки медных сплавов.

Коэффициенты $K_{v2}$ получены на основе анализа отечественных нормативных материалов и рекомендаций, а также рекомендаций по режимам резания зарубежных фирм, где примерно для одинаковых условий приводятся рекомендуемые параметры режима резания как для конструкционных углеродистых сталей, так и для медных сплавов. Следует отметить, что анализ как отечественных источников, так и зарубежных каталогов давал довольно значительный разброс значений $K_{v2}$. Поэтому величины $K_{v2}$, представленные в табл. 2, являются средними значениями, полученными в результате обработки данных литературных источников, заслуживающих доверия.

В том случае, когда в нормативных материалах приводятся параметров режима резания просто для обработки "медного сплава", это обычно означает, что приводимые данные условно соответствуют обработке сплава БрАЖ9-4 и для обработки другой марки медного сплава можно, в первом приближении, использовать поправочный коэффициент $K_{v1}$.

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что приведенные значения коэффициентов обрабатываемости можно рассматривать исключительно как приближенные и полученные с их помощью параметры режима резания медных сплавов следует использовать только в качестве стартовых величин, чтобы затем уточнить их после анализа результатов пробных проходов.

# Выставка "КИП Экспо-2007"

ЭКСПОЦЕНТР

С 17 по 19 октября 2007 г. на территории ЦВК "Экспоцентр" проходила четвертая международная выставка контрольного, анализирующего и измерительного оборудования. Организаторы выставки — ООО "Фор-Экспо" (Россия) при поддержке компании Novex и содействии ЦВК "Экспоцентр". В выставке приняли участие более 60 ведущих компаний из России и других стран. Они продемонстрировали новые разработки в области контрольно-именительного приборостроения. В статье приведено краткое описание некоторых экспонатов и предложений предприятий-разработчиков.

**ФГУП "ВНИИОФИ" (г. Москва)** продемонстрировало на выставке свои разработки.

*Компактный переносной пирометр мод. ДИЭЛТЕСТ-ТНЗП* пистолетного типа с микропроцессорным управлением и лазерным целеуказателем. Результат измерения отображается на цифровом дисплее. Пирометр не чувствителен к сильным электромагнитным полям,

имеет высокую точность измерения (погрешность не более 1 %), прост в эксплуатации, имеет низкое энергопотребление (может работать непрерывно до 40 ч без подзарядки аккумулятора). При серийном измерении запоминаются минимальное и максимальное значения температуры. Диапазон измерения температур — −30...+60 °С или +200...1200 °С. Расстояние при измерении 0,7...10 м. Габаритные размеры пирометра 210 × × 170 × 78 мм, масса не более 1 кг.

*Фотоэлектрический блескомер мод. БФ5-60/60* для измерения блеска лакокрасочных и эмалевых покрытий с целью оценки зрительного восприятия степени блеска при углах 20° и 60° направленного светового потока — угол освещения (наблюдения). Диапазон измерения 0...100 единиц блеска. Основная абсолютная погрешность измерения ±2 единицы блеска. Питание блескомера — от встроенного аккумулятора. Габаритные размеры 120 × 31 × 82 мм, масса 0,35 кг.

**Специальное конструкторско-технологическое бюро электроники, приборостроения и автоматизации (г. Углич Ярославской обл.)** показало на выставке различные преобразователи для систем автоматизации.

*Кварцевый преобразователь давления и температуры мод. ПДТК-Р-МС-23,* обеспечивающий прецизионное измерение давления агрессивных сред с возможностью компенсации температурной погрешности в интервале рабочих температур 0...+130 °С. В приборе в качестве разделителя установлен сильфон или мембрана из коррозионно-стойкой стали. Высокие характеристики преобразователя достигаются благодаря применению кварцевого резонатора — сенсора, частота которого изменяется при изменении воздействующего на него давления. Диапазон измерения давления 0...600; 800; 1000 МПа. Относительная приведенная погрешность преобразователя давления в интервале рабочих температур (с температурной компенсацией) не более 0,15 %. Чувствительность (разрешающая способность): по давлению — 0,001 %; по температуре — 0,01 %. Смещение нуля не более ±0,05 % в год. Питающее напряжение преобразователя 3 В. Его габаритные размеры: диаметр — 30 мм; длина — 204 мм; масса — 0,35 кг. Межповерочный период преобразователя один год.

*Датчик мод. ПДК-0,1-МР* с цифровым выходом для подключения кварцевых преобразователей температуры и давления к ПК и системам сбора и регистрации данных. Для передачи данных используется интерфейс PS 485 с протоколом обмена Modbus RTV. Датчик может быть оборудован панелью с индикатором и кнопочной клавиатурой, позволяющей следить за показаниями и вносить коррективы при его настройке. Питающее напряжение датчика 12 В.

**Компания ЗАО "Прибор РУ" (г. Москва),** специализирующаяся на поставках современных приборов промышленного применения, показала на выставке и предложила на российский рынок широкую гамму приборов, разработанных в России и за рубежом.

*Цифровой измеритель твердости по Шору мод. ТН-210* — портативный прибор со встроенным датчиком, оснащенный ярким и четким жидкокристаллическим дисплеем. Питание измерителя от батарейки, время непрерывной работы 300 ч. Вывод данных осуществляется через порт RS 232. Диапазон измерений 0...100 *HSD* с погрешностью ⩽ 1 *HSD.*

*Стационарный твердомер мод. ТН 500* для определения твердости цветных и черных металлов по Роквеллу. Прибор удобен в обслуживании и укомплектован индентером с шариком диаметром 1,6 мм, коническим алмазным индентером с углом 120° и V-образной наковальней диаметром 60 мм.

*Твердомер мод. MHV200S* — новейший цифровой твердомер со встроенной камерой и жидкокристаллическим монитором для измерения микротвердости по Виккерсу. Он обладает высокой точностью — 0,06 мкм и удобен в эксплуатации. Встроенный микропроцессор позволяет в автоматическом режиме проводить испытания, отображать величины твердости (5...3000 *HV*) и выводить данные измерений на печать. Максимальная высота обрабатываемого образца 75 мм. Питающее напряжение прибора 220 В, его габаритные размеры 441 × 270 × 480 мм, масса 31 кг.

*Цифровой измеритель TR-100* — компактный прибор для измерения в широком диапазоне шероховатости по двум параметрам: *Ra* и *Rz*, с пьезоэлектрическим датчиком. Он подходит для измерения шероховатости поверхности большинства материалов. Питание прибора от металлогидридной батарейки с возможностью подзарядки во время работы. Масса прибора 200 г.

*Ультразвуковой толщиномер ТТ-320* для измерения текущего и минимального значений толщины *H* (выбирается по заданной программе) стали с температурой ее поверхности −10...+300 °С. Оснащен встроенной памятью на 500 измерений. Результаты измерений даются в миллиметрах или дюймах. Прибор имеет блок индикации степеней разрядки источника питания. Яркость подсветки жидкокристаллического дисплея регулируется. Диапазон измеряемых толщин стали 5...80 мм при высокой температуре и 1,2...225 мм при нормальной. Погрешность измерений — 1 % от $H$ + 0,1 мм. Скорость ультразвука 1000...9999 м/с; при измерении стальных труб толщиной от 3 мм и диаметром 20 мм.

*Цифровой толщиномер ТТ-210* со встроенным датчиком для измерения толщины покрытий до 1250 мм как на магнитном, так и на немагнитном основании, с памятью на 500 измерений. Укомплектован жидкокристаллическим дисплеем с подсветкой. Имеется возможность вывода результатов измерений на ПК или на принтер через порт RS 232.

*Цифровой измеритель вибрации TV-300* для измерения колебаний различных узлов и механизмов в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц. Диапазоны измерения: ускорения — 0,1...392 м/с$^2$; скорости — 0,01...80 см/с; смещения — 0,001...18,1 мм. Результаты измерений

отображаются на большом жидкокристаллическом дисплее и могут передаваться на ПК через порт RS 232. Габаритные размеры прибора 171 × 78,5 × 28 мм, масса 230 г. Точность измерения ±5 %.

*Клещевой измеритель серии Fluke 322* для определения тока нагрузки, напряжения, а также обрывов цепей, разомкнутых выключателей и контактов, перегоревших предохранителей. Такие клещи-измерители хорошо подходят для измерения тока величиной до 400 А в тесных кабелепроводах.

*Мегометр Fluke 1550 B* — прибор, который можно использовать для тестирования изоляции распределительных устройств двигателей, генераторов и силовых кабелей с напряжением до 5000 В. Виды тестирования: от простых точечных измерений до тестирования изоляции на устойчивость по времени и на обрыв. Наличие функции сохранения результатов измерений и компьютерного интерфейса делают прибор идеальным для профилактического обслуживания.

*Анализатор Fluke 438* для диагностирования качества и устранения неисправностей в сети энергоснабжения, а также сбоев общего характера в работе оборудования. Прибор оснащен устройством меню для выбора режимов определения качества энергоснабжения. В одном приборе сочетаются возможности анализатора качества энергоснабжения, осциллографа на 20 МГц, мультиметра и регистратора данных.

*Шумомер Testo 815* для измерения уровня шума двигателей, станков, машин и других механизмов. Диапазон измерений прибора 32...130 дБ, погрешность ±1 дБ.

**ФГУП "НИИ вакуумной техники им. С. А. Векшинского"** предложило свою новую разработку — *вакуумметр мод. ВТТ-18-2* для измерения, индикации и регулирования давления в вакуумных установках в комплекте с манометрическим преобразователем типа ПМТ-2. Вакуумметр обеспечивает регулирование давления с помощью клапана-натекателя, имеющего дискретное или аналоговое управление. Допустимый ток дискретных выходов управления клапаном-натекателем 0,5 А при напряжении постоянного тока не более 30 В. Мощность, потребляемая вакуумметром, — 45 Вт. Его габаритные размеры 112 × 112 × 200 мм, масса 1,5 кг.

**ООО "Мониторинг"** показало на выставке анализаторы различного назначения, улучшающие условия труда.

*Малогабаритный газоанализатор "Монолит"* — многофункциональный прибор для определения содержания в промышленных выбросах загрязняющих веществ: $O_2$, CO, $CO_2$, NO, $NO_2$, $NO_x$ и $SO_2$. Кроме того, газоанализатор измеряет температуру, избыточное давление, разряжение и скорость газового потока в точке отбора пробы, а также вычисляет технологические параметры контролируемой установки. Принцип действия газоанализатора основан на применении комплекта электрохимических ячеек для измерения содержания газовых компонентов, термоэлектрического преобразователя для измерения температуры, двухплечевого мембранного датчика для измерения давления и трубки Пито для измерения скорости газового потока. Конструктивно газоанализатор выполнен в прочном пластиковом корпусе, на лицевую панель которого выведены: дисплей, клавиатура и все коммутационные разъемы. Измерительная информация отображается на жидкокристаллическом дисплее. Электропитание газоанализатора осуществляется от внутреннего аккумулятора (время работы не менее 10 ч) или от сети переменного тока. Габаритные размеры газоанализатора 200 × 76 × 140 мм, масса 2 кг (с принадлежностями — 5 кг).

*Переносной анализатор ДАСТ-1* для измерения концентрации (по массе) пыли в воздухе рабочей зоны, а также в выбросах в атмосферу. Принцип работы анализатора — радиоизотопный, основан на измерении числа бета-частиц, проходящих через одиночный аналитический фильтр с осажденной пылью. Время прогрева и выхода анализатора на рабочий режим измерений не более 10 мин. Имеется возможность передачи результатов измерений на ПК в аналоговой форме или по стандартному интерфейсу типа RS 232. Память прибора сохраняет до 1000 результатов измерений. Диапазон измерения концентрации пыли по массе 0,1...100 мг/м$^3$ при допустимой погрешности ±20 %. Время отбора пробы 1...30 мин. Потребляемая мощность 25 Вт. Работает при температуре окружающей среды 5...35 °С и относительной влажности 20...80 %. Габаритные размеры 320 × 140 × 280 мм, масса 8 кг.

**Фирма "АЯКС" (г. Москва)** предложила потребителям различные аппараты отечественного производства:

*аппарат АИД-70В* для испытания изоляции силовых кабелей и твердых диэлектриков выпрямленным и синусоидальным напряжением. Параметры аппарата при напряжении постоянного тока в продолжительном режиме при номинальном значении напряжения в сети: наибольшее рабочее напряжение — 50 кВ; наибольший рабочий ток — 20 мА. Потребляемая мощность не более 3 кВт. Габаритные размеры 850 × 800 × 500 мм, масса 80 кг;

*приставку мод. ПИМ-60* для испытания изоляционных масел (жидких диэлектриков), работающих в качестве изолятора в высоковольтных устройствах. Приставка позволяет при наличии аппарата АИД-70В проводить испытания жидких диэлектриков синусоидальным напряжением до 60 кВ. Габаритные размеры приставки 280 × 140 × 300 мм, масса 1 кг;

*аппарат АИМ-100ВЦ* для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков, работающих в качестве изоляторов в высоковольтных установках. Он оснащен четырехразрядным цифровым измерительным прибором для измерения напряжения на выходе через встроенный делитель. Аппарат также оснащен устройством с таймером для перемешивания масла после пробоя. Результаты изме-

рений записываются на карту памяти. Питающее напряжение аппарата 220 В, наибольшее пробивное напряжение 100 кВ, потребляемая мощность 510 Вт. Его габаритные размеры 380 × 350 × 340 мм, масса 38 кг.

**ООО "Научно-производственное предприятие "Сенсор" (г. Заречный Пензенской обл.)** демонстрировало на выставке световые, светозвуковые, звуковые взрывозащищенные сигнализаторы различного назначения.

*Светозвуковой сигнализатор мод. ВС-3-220В* для подачи звукового и светового сигналов при аварийной ситуации. Он может применяться в условиях воздействия атмосферных осадков и солнечного излучения. Работает сигнализатор следующим образом. При подаче питающего напряжения прерывисто загораются светодиоды и звучит модулированный "тревожный" звуковой сигнал. Корпус сигнализатора выполнен из алюминиевого сплава, имеет гальваническое антикоррозионное и защитное лакокрасочное покрытие. На лицевой панели корпуса расположены звуковой пьезоизлучатель и яркие светодиоды. Он укомплектован кабелем длиной не менее 1,5 м. Питающее напряжение сигнализатора 220 В, мощность 6 Вт, уровень звука 105 дБ, его частота до 4 кГц. Угол обзора не менее 120 °С. Работает сигнализатор при температуре окружающей среды −50...+60 °С, его масса 0,6 кг.

*Световой сигнализатор мод. ВС-4-С-220В* для подачи светового сигнала с целью индикации режимов работы оборудования и привлечения внимания людей к аварийным ситуациям. При подаче питающего напряжения загораются светодиоды с четырьмя режимами свечения: режимом постоянного свечения и тремя режимами мигания с различной частотой. Режим свечения устанавливается поднесением постоянного магнита к корпусу сигнализатора. Корпус сигнализатора также имеет защитное покрытие. Питающий кабель — круглого сечения с диаметром по изоляции 5...10 мм, длиной 1,5 м или более, возможно крепление бронированного кабеля. Питающее напряжение сигнализатора 220 В, угол обзора 120°. Работает сигнализатор при температуре окружающей среды −50...+60 °С.

**ЗАО "Промышленное диагностическое оборудование и системы контроля" (г. Москва)** предложило потребителям испытательную и измерительную технику, разработанную за рубежом:

*измеритель вибрации карандашного типа мод. TV200* — портативный прибор для измерения вибрации машинного оборудования и быстрой проверки состояния подшипников и зубчатых колес. Прибор может измерять: среднеквадратичную скорость вибрации; пиковое ускорение; величину смещения. Оснащен защитой в случае неправильного срабатывания механизма. Результат измерения удерживается на приборе в течение 40 с. Работает прибор от встроенной батарейки;

*универсальную гидравлическую испытательную машину WEW-2000* с отображением результатов на экране для испытания на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг металлических и неметаллических материалов. Применение операционной системы Windows расширило функциональные возможности машины и позволило ввести такие функции, как обработка данных в автоматическом режиме, включая максимальные нагрузки, верхний и нижний предел текучести, предел непропорционального напряжения. Максимальная нагрузка при работе прибора 2000 кН;

*машину серии TL* для испытания пружин на растяжение и сжатие, оснащенную индикатором с круговой шкалой с верхним и нижним пределами отсчета. Нагружение осуществляется ручным рычагом. Максимальная испытательная нагрузка 30...5000 Н для всех видов цилиндрических пружин;

*машину серии TNS* с двойным цифровым дисплеем для испытания пружин на скручивание. Машина применяется для измерения угла и момента скручивания различных торсионных и спиральных пружин, различных гибких эластичных комплектующих и других устройств, использующих трение. Максимальные: испытательный скручивающий момент — 500...100 000 Н · мм; угол скручивания — 9999,9°;

*машину серии TPJ* для механического испытания пружин на усталость с электронной индикацией. Она оснащена автостопом по времени и разрыву пружины. Диапазон испытательных частот 0,5...5 Гц. Максимальный диаметр испытуемых пружин 150 мм, их максимальная высота в свободном состоянии 390 мм;

*машину серии NOW* для испытания на скручивание металлических частей и компонентов с компьютерным управлением. Максимальный испытательный скручивающий момент 2000 Н · м. Скручивающий момент и угол скручивания измеряются датчиком скручивания и фотоэлектронным датчиком положения с высокой точностью. На экране компьютера прибора отображаются кривая скручивания, скорость нагрузки и ее пиковое значение.

**Фирма GOM GmbH (Германия),** специализирующаяся на технологиях трехмерной оцифровки измерений, анализе деформаций и контроле качества, среди прочих экспонатов демонстрировала систему ARG US для измерения деформаций листа металла в процессе штамповки детали. Она оснащена ПК. В процессе штамповки на листовой металл наносится равномерный точечный растр способом электрохимического травления. Система рекомендована для определения участков критической деформации, решения проблем формования сложных деталей, оптимизации процесса штамповки и проверки штампов.

Выставка прошла с большим успехом, ее посетило большое число специалистов, работающих в области КИП и автоматики различных отраслей промышленности. Были организованы презентации новых разработок, заключены взаимовыгодные деловые соглашения.

*А. Н. ИВАНОВ, чл.-корр. АПК*

**American Machinist. 2007. Nr. 8**

**Vernyi B.** Реально необходимое число осей обработки, с. 4.

На примере токарного станка фирмы Index, предназначенного для обработки деталей диаметром до 32 мм по 13 осям, анализируется целесообразность применения большого числа осей у станка. Этот станок предлагался в качестве альтернативы токарным прутковым автоматам. Указывается, что в настоящее время испытывается недостаток в квалифицированных программистах, способных обеспечить работу таких станков.

**Новости промышленности**, с. 12, 14, ил. 1.

Фирма Adobe Systems разработала восьмую версию ПО Adobe Acrobat 3D, с помощью которой пользователь может преобразовать любой файл программного продукта 3D CAD, включающий крупные ассемблеры объемом свыше 500 Мбайт, в единый документ PDF. Файл PDF может обеспечить точную геометрию или быть сжат более чем в 100 раз по сравнению с исходным файлом в зависимости от конкретного рабочего процесса. Также легко можно комбинировать трехкоординатные данные CAD с другой критической информацией о процессе обработки.

**Benes J.** Зажимные устройства, с. 14, ил. 2.

Описана делительная головка DD200 Direct-Drive Rotary фирмы Hardinge с поворотной планшайбой диаметром 254 мм и высокоскоростным и высокомоментным приводом вращения планшайбы без зубчатых передач. Поворот планшайбы осуществляется со скоростью 2,1 °/с с точностью ±2″. Описан также двухосный поворотный стол 5AX-200 II CNC фирмы Lyndex-Nikken с червячной передачей в приводе вращения, которая состоит из твердосплавного червяка и стального червячного колеса с ионным азотированием толщиной 0,1 мм и твердостью 68 *HRC*. Изнашивание такой передачи в 8 раз меньше стандартной червячной передачи с бронзовым червячным колесом.

**Haftl L.** Оборудование для нефтяной и газовой промышленностей, с. 25—27, ил. 2.

Высокая стоимость нефти и природного газа обусловливает необходимость нового соответствующего оборудования. Большая глубина скважин и сложные геологические условия требуют использования более сложного и более дорогого оборудования. До тех пор пока цена барреля нефти остается высокой, фирмы будут вкладывать средства в новые и модернизированные буровые установки. Достоверным свидетельством экономического бума в нефтяной промышленности является число пробуренных каждый год скважин. По данным Американского института нефти (API), в 2006 г. были пробурены 49 375 скважин (нефтяных, газовых и сухих).

**Haftl L.** Двенадцать базовых критериев эффективности производства, с. 28—31, ил. 13.

"Модернизация или смерть" — перефразированный девиз французского иностранного легиона — вполне соответствует американским металлообрабатывающим предприятиям. Конкуренция, внутренняя и внешняя, никогда не была такой жестокой, а необходимость постоянной модернизации и увеличения производительности никогда не была столь настоятельной. Среди рассматриваемых двенадцати базовых критериев эффективности производства наиболее существенными являются следующие: чистая прибыль — прибыль в процентах на каждый вложенный доллар (Profit Margin); возврат вложенных средств — чистая прибыль, поделенная на инвестированный капитал (ROI); доход — годовой доход, поделенный на суммарную оплату человеко-часов (Revenue). К рассматриваемым критериям относится и качество работы, выражаемое процентом продукции, которая проходит окончательный контроль с первого предъявления (First Pass).

**Bates Ch.** Система профессиональной подготовки кадров машиностроителей, с. 33—35, ил. 1.

Описывается система профессиональной подготовки студентов и переподготовки специалистов, принятая в Институте промышленного производства и на фирмах Mazak и Mori Seiki. В институте студенты знакомятся с новациями в области технологии обработки резанием и проходят практические занятия на станках фирмы Okuma, которые используются не только для обучения, но и для изготовления промышленной продукции. Кроме того, Институт проводит консультации и помогает решать конкретные производственные проблемы.

**Новое оборудование**, с. 50, 51, ил. 3.

Представлены: прецизионная зубчатая рейка фирмы Atlanta Drive Systems для металлорежущих станков с высокими точностью и мощностью; многоцелевой станок FZ 08 KS M фирмы Chiron America для одновременной обработки по пяти осям (три линейные и две дополнительные оси); установка фирмы Columbia Marking Tools для маркировки с волокнистым диодным лазером мощностью 10 и 20 Вт; многоцелевой станок с ЧПУ Excelsior Lite фирмы Datron Dynamics для высокоскоростной обработки деталей размерами до 6 мм; компактное загрузочное устройство для металлорежущих станков DS1100-MTL-TD, обеспечивающее загрузку и разгрузку лотков и транспортеров и способное перемещаться от станка к станку.

**Cutting Tool Engineering. 2007. Vol. 59. Nr. 2**

**Kennedy B. et al.** Рекомендации по фрезерованию тонкостенных изделий, с. 26, 28—33, ил. 6.

В аэрокосмической отрасли в настоящее время применяется много тонкостенных изделий. Практика показала, что в ряде случаев их выгоднее фрезеровать из целого, чем использовать сборные. Это относится к изделиям, в которых толщина стенок составляет 0,25 ÷ ÷ 1,5 мм. При этом необходима тщательная отработка

технологий (в том числе экспериментальная) во избежание деформаций деталей из-за больших поперечных сил. Рекомендуется использовать попутное (а не встречное) фрезерование, когда вначале образуется толстая стружка, а затем она становится все тоньше, при этом поперечные силы минимизируются. Для минимизации вибраций рекомендуется применять фрезы с переменным шагом зубьев.

### European Tool and Mould making. 2006/07. V. 6 (спецвыпуск Buyer's guide)

**Международная** ассоциация специального инструмента, с. 8, 10, 11, ил. 2.

Описаны области деятельности и задачи Международной ассоциации специального инструмента и механообработки (ISTMA), в которую входят три региональные отделения: Америки, Азии и Европы. Ее задачи — укрепление партнерства между членами, защита их интересов перед международными организациями и отраслевыми ассоциациями, повышение эффективности и прибыли своих предприятий, разработка рекомендаций и стандартов для подготовки продукции, в том числе штампов, пресс-форм, специальных приспособлений и оснастки.

**Система** программирования, с. 16, ил. 1.

Программный пакет *hyper*Mill (версия 9.5) фирмы Open Mind Technologies AG (Германия) имеет широкий инструментарий для подготовки управляющих программ. Используются макрокоманды и характеристики, задаваемые пользователем. Стандартизовано программирование повторяющихся и подобных геометрических характеристик. Любая типовая геометрия используется в качестве стандартной характеристики. Программируется обработка по трем и пяти осям. Технологические приемы и инструменты записываются в макросы. Возможно одновременное управление по пяти осям.

**Режущие** пластины, с. 36, ил. 1.

Фирма Kieninger предлагает многогранные режущие пластины WPR AR и WPB AR (торговая марка Air-Jet) нового поколения с встроенной системой воздушного охлаждения. Режущие пластины имеют специальные каналы для подвода охлаждающего воздуха непосредственно к режущим кромкам. Новые пластины обеспечивают большую интенсивность съема обрабатываемого материала. Предусмотрено предохранение режущих кромок от повреждения стружкой.

**Стационарный** патрон с повышенной гибкостью, с. 46, ил. 1.

Описаны стационарные экономичные патроны для пятикоординатных станков марки Manok немецкой фирмы Hainbuch GmbH Spannende Technik, обеспечивающие надежный зажим и жесткость. Сообщается о выпуске улучшенной модели патрона Manok plus chuck, в котором не используется пружинный разжим, а установлен встроенный разжимной механизм, срабатывающий от упоров станка.

**ГПЯ** с обрабатывающими центрами, с. 58, ил. 1.

Фирма Riello Sistemi S.p.A. (Италия) выпускает ячейку MC4 следующего поколения для обработки изделий с размерами до 500 мм из стали, чугуна и алюминия средними и крупными партиями. Ячейка содержит два независимых обрабатывающих центра с монолитными станинами с сетками ребер, что обеспечивает высокие статическую и динамическую жесткости. Возможны пятикоординатная и пятисторонняя обработка деталей с одного установа. Применение в главном приводе мотор-шпинделя исключает зазоры, что повышает точность обработки. Предусмотрена цифровая индикация перемещений при высокой разрешающей способности. Машины оснащаются быстродействующими четырехпозиционными устройствами автоматической смены спутников.

**Универсальный** круглошлифовальный станок с ЧПУ, с. 65, ил. 1.

Фирма Fritz Studer AG (Швейцария) выпустила компактный универсальный круглошлифовальный станок мод. S31 HSM CNC для наружной и внутренней обработки деталей средних размеров с одного установа. Он предназначен в основном для шлифования валов двигателей, зубчатых колес насосов, различных компонентов и инструментов для инжекционной формовки, установочных штифтов и держателей инструментов. ПО StuderForm HSM позволяет реализовать ряд технологических приемов, в том числе прямое врезание с осцилляцией, угловое врезание, врезание с целью образования заплечиков и многократное врезание с последующим шлифованием продольными проходами.

### Fertigung. 2006. Nr. 10

**Специализированный** обрабатывающий центр go-Mill 350, с. 14, 15, ил. 2.

Центр go-Mill 350 выпускается фирмой Liechti Engineering AG и предназначен для изготовления турбинных лопаток реактивных двигателей для небольших самолетов бизнес-класса, спрос на которые в последние годы возрастает. Вертикальный шпиндель перемещается по осям $Y$ и $Z$, шпиндель изделия с двумя моментными электродвигателями — по радиусным осям и оси $X$. Мощность шпинделя — 16 кВт, крутящий момент — 82 Н · м, частота вращения до 20 000 мин$^{-1}$. Станок комплектуется ПО Turbusoft, 30-местным инструментальным магазином и 16-местным магазином спутников.

**Обрабатывающий** центр MAG-3, с. 16, 17, ил. 2.

Центр MAG-3 выпущен фирмой Makino и в настоящее время успешно используется на фирме Ruag Aerospace (Швейцария) для изготовления деталей из массивных алюминиевых заготовок. Привод шпинделя центра имеет мощность 80 кВт, максимальную частоту вращения 33 000 мин$^{-1}$. Производительность обработки до 8000 см$^2$/мин. Перемещения по осям — 4000, 1800 и 1000 мм. Центр комплектуется системой контроля шпинделя и системой предотвращения столкнове-

ний Spindle-Anti-Damage. Дисковый магазин вмещает 60 инструментов.

**Австрийские** станки в США, с. 20, 21, ил. 2.

Малое предприятие Alro Machine в Нью-Йорке приобрело за 1 млн долл. обрабатывающий центр M40-G Millturn австрийской фирмы WFL Millturn Technologies и успешно использует его для изготовления ответственных деталей современных самолетов. Время обработки сокращается до 60 %. Центр имеет два противоположных шпинделя и двухдисковый магазин на 12 инструментов.

**Универсальный** электроэрозионный станок Agiecut Progress 2, с. S10, S11, ил. 2.

Станок Agiecut Progress 2, выпускаемый фирмой Agie GmbH, предназначен для изготовления профильного инструмента из поликристаллических алмазов для обработки широко используемых в автомобилестроении легких сплавов, пластмасс и графита. Заготовки инструмента вырезаются на том же станке из соответствующих полуфабрикатов. К станку прилагается ПО EDM-map, разработанное совместно с фирмой Esco GmbH. Обработка производится в соответствии с данными инструмента, полученными в системе CAD-CAM.

**Компактный** токарный центр NZ-S1500, с. S24.

Центр NZ-S1500, выпущенный фирмой Mori Seiki, предназначен для изготовления валов диаметром 20 ÷ ÷ 60 мм из заготовок с максимальным диаметром 120 мм. Оригинальная конструкция станка позволила уменьшить его размеры на одну треть относительно размеров сопоставимых моделей; его высота всего 1500 мм. Центр имеет два симметрично расположенных инструментальных механизма.

**Многоугольный** патрон Tribos на службе "Лайнера мечты", с. 30, 31, ил. 3.

Канадская фирма Boeing производит ответственные детали для самолета Boeing 787 Dreamliner, используя для этого, в частности, пятикоординатный продольно-фрезерный станок портального типа FZ 32 фирмы F Zimmermann GmbH, укомплектованный оригинальным многоугольным патроном типа Tribos фирмы Schunk GmbH & Co KG. Основное достоинство патрона — отсутствие движущихся деталей и, следовательно, износа. Зажим инструмента осуществляется за счет сил упругости стали, время смены инструмента не превышает 20 с, радиальное биение 0,003 мм.

### Form + Werkzeug 2006. Nr. 5 (декабрь)

**Новые** обрабатывающие центры, с. 47, ил. 1.

Последняя новинка фирмы Alzmetall — центр GS 1000/5-T, особенностями которого являются встроенные в боковые стенки станины моментные двигатели и сниженное на 100 мм расположение стола (ось *C*), позволившие увеличить расстояние между столом и главным шпинделем до 790 мм и перемещение по оси *Y* до 800 мм. Центр особо рекомендуется для инструментальной и авиационной промышленности, где его применение позволяет сократить основное машинное время до 60 %. Фирма HURCO выпустила пятикоординатный центр VMX 1 для экономичного изготовления единичных и мелкосерийных деталей. Он занимает площадь всего 1,9 × 2,5 м, имеет перемещения по осям 660, 355 и 455 мм, частоту вращения шпинделя до 10 000 мин$^{-1}$.

**Обрабатывающий** центр LinX Compact., с. 48, ил. 1.

Центр LinX Compact, выпускаемый фирмой JOBS, комплектуется линейными двигателями и подвижной траверсой, имеет три исполнения с различными величинами перемещений по осям и предназначен для высокоскоростной и высокопроизводительной обработки. Большой выбор фрезерных головок делает его особенно пригодным для использования в инструментальных производствах.

**Микроинструменты**, с. 48, ил. 1.

Фирма SPPW Spanabhebende Prazisionswerkzeuge предлагает микроинструменты, изготовляемые в рамках специальной программы, включающей 25 000 изделий. Речь, в частности, идет об инструментах "Multi-Form" с хвостовиками различного конструктивного исполнения и диаметром 3 *h*6. Фирма выпускает 40 вариантов инструмента для фрезерования с четырьмя базовыми геометриями. По этой же программе выпускаются сверла и развертки диаметром 0,2÷0,6 мм.

**Комбинированные** режущие инструменты, с. 49, ил. 1.

Фирма Emuge предлагает комбинированный инструмент "сверло—резьбовая фреза" с четырьмя стружечными канавками для обработки отверстий длиной до 2,5 *D*. За один проход этот инструмент выполняет три операции обработки: сверление, снятие фаски по отверстию и нарезание резьбы в отверстии. Инструмент отличается высокими стабильностью и виброустойчивостью.

**Высокопроизводительные** фрезы, с. 58, ил. 1.

Фирма Fette предлагает цельнотвердосплавные концевые фрезы MultiEdge 2Feed диаметром от 1 до 3 мм в "коротком" и "очень коротком" исполнении с покрытием Ali Plus. Фрезы диаметром больше 4 мм выпускаются в "длинном" и "очень длинном" исполнении. Фрезы предназначены для обработки очень мелких деталей с большой подачей, например с подачей на зуб, превышающей на 500 % подачу на зуб у фрез с обычной геометрией.

**Прецизионное** фрезерование закаленных сталей, с. 56—58, ил. 3.

Фирма Hemtech Machine Tools (Нидерланды) выпустила фрезерный станок Nano-Focus-425, на котором можно обрабатывать детали твердостью выше 64 *HRC* при отклонениях формы и расположения менее 5 мкм. Он имеет главный шпиндель с гидростатическим опиранием, частотой вращения до 36 000 мин$^{-1}$ и радиальным биением не более 0,3 мкм. Важнейшая особенность станка — минимальная масса движущихся частей, что достигается применением тонкостенных деталей из высокопрочных материалов с коэффициентом удлинения, близким к нулю. Перемещения по осям равны 900, 500 и 350 мм. Станок комплектуется магазином на

28 инструментов и стандартными спутниками с размерами 400 × 400 × 250 мм и массой до 75 кг.

**Станки** фирмы Zimmer (Германия), с. 70—71, ил. 1.

Электроэрозионный станок Genius 602 предназначен для изготовления микродеталей с очень жесткими допусками, например для прошивки отверстий диаметром 0,15 мм, глубиной 4 мм при минимальной ширине перемычки 0,03 мм в течение 5 мин. Описаны также производственный модуль FMC, в который входят высокоскоростной фрезерный станок Robodrill фирмы Fanuc, измерительная машина фирмы Mitutoyo, электроэрозионный станок Genius 700 и автоматический манипулятор Chameleon.

**Охлаждающая** жидкость, с. 90, ил. 1.

Фирма Fuchs Europe предлагает смешиваемую с водой охлаждающую жидкость Ecocool Ferrostar, отвечающую требованиям экологической безопасности и не содержащую консервантов. Эта СОЖ предназначена для обработки стали и чугуна. СОЖ Ecocool Alustar предназначена для обработки алюминия. Показатель pH составляет 7,5, т. е. она практически нейтральна и не оказывает вредного влияния на кожу человека.

**Modern Machine Shop 2007. V. 79. Nr. 10 (март)**

**Korn D.** Технология обработки обшивки крыла самолета V-22 Osprey, с. 72—76, ил. 3.

Подробно описана технология обработки обшивки крыла самолета на предприятии фирмы Bell Helicopter-Textron, Inc. (США) с использованием системы адаптивного управления. База данных этой системы содержит порядковые номера изделий, дату обработки и время, фамилию оператора, результаты контроля на каждом этапе. Описан комбинированный станок Trim Cell фирмы Flow International (США), на котором обрабатываются обшивки крыльев, лонжероны и поперечные ребра жесткости самолета. Обшивка крыла устанавливается на этот станок после того, как оператор проконтролировал установку сопел для направления водяной струи с абразивом. Каждая обшивка имеет триммеры с шариками для установки на три опоры, смонтированные на станине станка. Затем оператор получает рекомендацию по вызову макрокоманды на установку фиксаторов, и вакуумные присосы закрепляют заготовку. После установки заготовки с помощью L-образной измерительной головки, разработанной совместно фирмами Bell Helicopter-Textron. Inc. и Renishaw, определяются позиции средних линий каждого стрингера. Форма головки позволяет контролировать обе вертикальные части стрингера. Программа сверления и фрезерования отверстий под заклепки модифицируется в соответствии с замерами так, чтобы высота углубления была выдержана с точностью ±0,38 мм. Такая технология позволяет предотвратить выступание панели над поверхностью обшивки.

*Г. С. ПОТАПОВА*

*По вопросам получения и перевода материалов из зарубежных журналов обращаться к Г. С. Потаповой по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru, веб-сайт: www.stankoinform.ru*

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА "ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ"**

Подписка на журнал принимается по каталогам:

"Роспечать" — индекс **70120**;
"Пресса России" — индекс **27841**;
"Почта России" — индекс **60264**

# Autodesk предоставляет студентам-дипломникам лицензионные версии своих продуктов

28 января 2008 г., Москва — компания Autodesk объявила об акции "Диплом с Autodesk!", приуроченной ко Дню российского студенчества. Студенты технических специальностей могут получить бесплатные версии решений Autodesk для выполнения своих дипломных работ. Всего в ходе акции Autodesk планирует раздать около 6 000 дисков с такими версиями. Их могут получить все студенты, работающие в настоящее время над курсовыми и дипломными проектами. Для этого достаточно зайти на www < http://www.autodesk.ru/students >, заполнить анкету, в которой указать необходимое программное обеспечение, свои контактные данные, ВУЗ и номер студенческого билета, а затем получить диск по почте.

Идея проведения акции "Диплом с Autodesk!" возникла неслучайно. Впервые студенческие версии компания раздала осенью 2007 г. на выставках Softool < http://www.softool.ru/ > ; и < http://www.zodchestvo.com/ >; < Зодчество > , где программное обеспечение Autodesk было очень востребовано студентами технических специальностей и особенно дипломниками. Дело в том, что оно позволяет не только автоматизировать рутинную работу и достойно представить проект перед комиссией, но и воплотить самые смелые идеи.

"Мы понимаем, что не все желающие успеют получить диск в течение этой акции, — говорит Елена Шумилова, координатор образовательных проектов Autodesk в СНГ. — Но мы хотим, чтобы студенты и преподаватели всегда имели возможность использовать в образовательных целях легальное программное обеспечение. В течение всего года его можно бесплатно загрузить с сайта Студенческого сообщества < http://www.students.autodesk.com/ > ; Autodesk www < http://www.students.autodesk.com > ; .students.autodesk.com > ".

Часть дисков будет передана студентам ВУЗов, с которыми Autodesk сотрудничает в рамках программы "3D Образование". С целью подготовки нового поколения инженеров, строителей и архитекторов Autodesk поддерживает партнерские отношения с МГТУ им. Н. Э. Баумана, Санкт-Петербургским архитектурно-строительным университетом, Московским государственным строительным университетом, Иркутским государственным техническим университетом и многими другими ВУЗами и средними профессиональными учебными заведениями. Политика компании в области образования заключается в том, чтобы сделать доступными самые современные технологии для студентов разных учебных заведении, стремящихся к инновациям. Поэтому Autodesk на льготных условиях предоставляет университетам программное обеспечение, проводит обучение преподавателей, способствует разработке методик обучения с использованием современных технологий, поддерживает конференции, олимпиады и конкурсы.

Акция Autodesk направлена на то, чтобы каждый дипломник применял в своей работе легальный софт. "Культуру легального пользования программными продуктами нужно воспитывать со студенческой скамьи, — отмечает Елена Шумилова. — Студенты могут прислать свой готовый дипломный проект на наш конкурс студенческих работ < http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/index?siteID = 871736&id = 10310166 > ; "Испытай возможности". И не только выиграть призы, но и получить достойные предложения по работе от наших партнеров и клиентов. Мы уверены, что участие в акции "Диплом с Autodesk!" станет важным шагом в профессиональном росте студентов".

---

# "Сименс" помогает российским техникумам и колледжам

Департамент "Техника автоматизации и приводы" компании "Сименс" продолжает программу поддержки российского образования. В рамках данной программы в 2006—2007 гг. были проведены "Логическая олимпиада" и конкурсный отбор ВУЗов. По результатам конкурса кафедрам-победителям было предоставлено оборудование для создания лабораторных стендов.

Сейчас департамент "Техника автоматизации и приводы" компании "Сименс" проводит открытый конкурсный отбор техникумов и колледжей для предоставления им в безвозмездную аренду комплекта оборудования для создания лабораторных стендов. Это оборудование позволит будущим техническим специалистам получить не только теоретические, но и практические навыки работы с современным оборудованием для автоматизации производственных процессов.

**"Сименс АГ" (Берлин и Мюнхен)** – мировой лидер в области электроники и электротехники. Концерн действует в таких областях, как индустрия и энергетика, а также в сфере здравоохранения. Около 400 000 сотрудников разрабатывают и производят продукцию, проектируют и создают системы и оборудование, предлагают индивидуальные решения для конкретных заказчиков. Более 160 лет "Сименс" олицетворяет технический прогресс, инновации, качество, надежность и международное сотрудничество. В 2007 финансовом году (по

состоянию на 30 сентября) оборот концерна составил 72,4 млрд евро.

В России концерн работает по всем традиционным направлениям своей деятельности, присутствует в 30 городах страны и является одним из ведущих поставщиков продукции, услуг и комплексных решений для модернизации ключевых отраслей российской экономики и инфраструктуры. В региональной компании "Сименс" занято около 3000 сотрудников. Объем заказов "Сименс" в России в 2007 финансовом году (с учетом реструктуризации бизнеса) превысил 1,2 млрд евро, а оборот составил около 950 млн евро.

## Прибыль ОАО "Пермметалл" по итогам 2007 г. увеличилась на 86 %

ОАО "Пермметалл" подвело итоги 2007 г. По результатам отчетного периода выручка компании составила 798,6 млн руб., что на 45 % больше аналогичного показателя предыдущего периода. Напомним, в 2006 г. выручка "Пермметалла" составила 551,3 млн руб. Прибыль предприятия в 2007 г. достигла отметки 125 млн руб. Рост прибыли по сравнению с предыдущим периодом составил 86 %, прибыль в 2006 г. равнялась 68,7 млн руб.

Активная продажа листового проката позволила ОАО "Пермметалл" увеличить прибыль от этого направления работы почти в 2 раза. Столь динамичный рывок произошел благодаря вводу в ассортиментную матрицу проката нержавеющих сталей и спецсталей.

Кроме того, добиться существенного роста бизнеса "Пермметаллу" позволила новая стратегии компании. "Пермметалл" принял решение сфокусироваться на работе с машиностроительными предприятиями России. Новая стратегия уже принесла свои плоды. Среди крупных покупателей предприятия в 2007 г. появились "Курганский машиностроительный завод", "Уралвагонзавод", "Уралмаш" и др. Более того, потребителями продукции "Пермметалла" в прошедшем году стал ряд зарубежных компаний. В 2007 г. пермская компания заключила контракты с рядом азербайджанских промышленных предприятий, выпускающих оборудование для нефтяной отрасли.

Генеральный директор ОАО "Пермметалл" Григорий Меньшиков считает, что новая стратегия позволит укрепить позиции пермского металлотрейдера и добиться существенного роста прибыли:

"Работа с машиностроительными компаниями требует особого подхода. Мы смогли перестроить нашу ассортиментную матрицу под нужды потребителей и уже получили отклик от клиентов. Уверен, что в 2008 г. мы сможем закрепить наш успех, обеспечив машиностроительные предприятия России и Зарубежья качественным металлом в необходимых им количествах."

***

ОАО "Пермметалл" основано в 1925 году. Компания является крупнейшим металлотрейдером Пермского края. "Пермметалл" поставляет своим заказчикам более 7000 наименований металлопродукции, которую приобретают более 9000 потребителей. Партнерами компании являются крупнейшие металлопроизводители России, среди которых "Магнитогорский металлургический завод", ТД "Эстар", ТД "Уралтурбосталь" и др.

Калашников А. С.
**Технология изготовления зубчатых колес.**
1-е изд. — М: Машиностроение, 2004. — 480 с.
ISBN: 5-217-03233-2
**Цена 363 р**. (с НДС)

Изложены основные сведения о зубчатых передачах, материалах, методах получения заготовок зубчатых колес и их термическая обработка. Рассмотрены современные методы изготовления и контроля зубчатых колес. Приведены рекомендации по отделке базовых поверхностей и построению технологического процесса обработки зубчатых колес.

Описаны новые зубообрабатывающие станки с ЧПУ и их технологические возможности, прогрессивные конструкции режущего инструмента и зажимных приспособлений. Даны рекомендации по выбору режимов резания зубчатых колес.

Для квалифицированных рабочих и наладчиков, занятых в производстве зубчатых колес; полезна технологам машиностроительных предприятий, а также студентам втузов.