



# ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**1**  
**2020**

Главный редактор **А.И. САВКИН**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

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

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

**ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»**

Адрес издательства:

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

Адрес редакции:

**107076, Москва,  
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2  
Телефон: 8-(495) 661-38-80.  
E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru  
www.mashin.ru**

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ № 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Учредитель: **А.И. Савкин**

Индекс: **27841** ("Пресса России")

Цена свободная

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

# СОДЕРЖАНИЕ

# CONTENTS

## КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

## DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Иванов А. С. — Функции надежности для отдельных видов отказов машин . . . . .	3
Петухов Ю. Е., Домнин П. В., Сяочуан Чжэн — Математическая модель определения профиля червячных фрез . . . . .	10
Крыхтин Ю. И., Карлов В. И. — Гидравлический привод управления заслонкой водометного движителя плавающей гусеничной машины . . . . .	13
Галдин Н. С., Семенова И. А. Гидравлические ножницы на базе экскаватора . . . . .	18
Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А. — Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве . . . . .	21
Самодурова М. Н., Барков Л. А., Латфулина Ю. С. — Новые конструкции контактных головок токосъемников троллейбусов с графитопластовыми вставками . . . . .	26
Аскаров Е. С. — Центробежно-гирационная мельница для тонкого самоизмельчения продукта . . . . .	28

Ivanov A. S. — Reliability functions for certain types of machine failures	3
Petukhov Yu. E., Domnin P. V., Syaochuan Chzhen — Mathematical model for determining the profile of worm mills	10
Krykhtin Yu. I., Karlov V. I. — Hydraulic drive for controlling the shutter of a water-jet propulsion system of an amphibious tracked vehicle	13
Galdin N. S., Semenova I. A. — Hydraulic shears based on an excavator	18
Kabalidin Yu. G., Shatagin D. A. — Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production	21
Samodurova M. N., Barkov L. A., Latfulina Yu. S. — New designs of contact heads for trolleybus current collectors with graphite-plastic inserts	26
Askarov E. S. — Centrifugal gyration mill for fine product self-grinding	28

### Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

### Problems of tribology — friction, wearing away and lubrication

Меделяев И. А. — Контактное взаимодействие деталей машин при смазывании . . . . .	32
Албагачиев А. Ю., Ставровский М. Е., Сидоров М. И., Рагуткин А. В. — Обратные задачи кинетики накопления повреждений и разрушения материалов при трении . . . . .	38

Medelyaev I. A. — Contact interaction of machine parts during lubrication	32
Albagachiev A. Yu., Stavrovskiy M. E., Sidorov M. I., Ragutkin A. V. — Inverse problems of the kinetics of damage accumulation and failure of materials during friction	38

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

## MANUFACTURING ENGINEERING

Ахметханов Р. С. — Фрактальный анализ тепловых полей при неразрушающем контроле композиционных материалов . . . . .	44
Базров Б. М., Гайнутдинов Т. М. — Факторы, влияющие на выбор технологических баз при изготовлении детали . . . . .	48
Онищенко А. К. — Водородная деградация материалов при термообработке заготовок из сталей и титановых сплавов . . . . .	51
Копылов Ю. Р., Бирюков М. И. — Портативный станочный модуль с лазерной системой базирования для обработки изношенных клиновых пазов рамы тележки подвижного состава . . . . .	57
Гафаров А. М., Садыгов В. Б., Мамедов Э. Д., Калбиев Ф. М. — Влияние технологических параметров доводочного шлифования на шероховатость поверхности . . . . .	59
Бобровский А. В., Драчев О. И., Горшков Б. М. — Технология обработки шпоночных пазов в длинномерных маложестких валах . . . . .	63
Панайоти В. А., Мешков В. В., Курнасов Е. В. — Технология снижения температуры при шлифовании быстрорежущей стали . . . . .	68
Козлов Г. В., Долбин И. В. — Сравнение эффективности углеродных нанотрубок и графена как армирующей компоненты нано-композитов . . . . .	73

Akhmetkhanov R. S. — Fractal analysis of thermal fields in non-destructive testing of composite materials	44
Bazrov B. M., Gai'nutdinov T. M. — Factors affecting the selection of technological bases in the manufacture of a part	48
Onishchenko A. K. — Hydrogen degradation of materials during heat treatment of billets of steel and titanium alloys	51
Kopylov Yu. R., Biryukov M. I. — Portable machine module with a laser-based system for processing of worn wedge grooves of the rolling stock carriage frame	57
Gafarov A. M., Sadygov V. B., Mamedov E. D., Kalbiev F. M. — Influence of technological parameters of finish grinding on surface roughness	59
Bobrovskiy A. V., Drachev O. I., Gorshkov B. M. — Technology for processing keyway slots in long non-rigid shafts	63
Panai'oti V. A., Meshkov V. V., Kurnasov E. V. — Technology for temperature reduction during grinding of high speed steel	68
Kozlov G. V., Dolbin I. V. — Comparison of the effectiveness of carbon nanotubes and graphene as a reinforcing component of nanocomposites	73

### Проблемы теории и практики резания материалов

### Problems of theory and practice of materials cutting

Железнов Г. С., Андреева С. Г. — Определение отклонений размера и формы отверстий при развертывании . . . . .	76
Григорьев С. Н., Селиванов А. С., Бобровский И. М., Канатников Н. В., Пашментова А. С. — Исследование влияния конструкции режущей части инструмента на силу резания при обработке колес с неэвольвентным профилем зубьев . . . . .	80

Zheleznov G. S., Andreeva S. G. — Determination of deviations in the size and shape of holes during reaming	76
Grigor'ev S. N., Selivanov A. S., Bobrovskiy I. M., Kanatnikov N. V., Pashmentova A. S. — Research of the influence of the tool cutting part design on cutting force when machining of gear wheels with a non-involute tooth profile	80

## ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ

## PROBLEMS OF ECOLOGY AND SAFETY

Гайсин С. В., Кутенёв В. Ф. — Влияние конструкции автомобиля на выбросы твердых частиц в окружающую среду крупных городов . . . . .	84
---	----

Gai'sin S. V., Kutenev V. F. — Influence of vehicle design on solid particles emissions in the environment of large cities	84
--	----

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

Сдано в набор 28.10.2019. Подписано в печать 18.12.2019.  
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

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

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 621.192.002.5

А. С. ИВАНОВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

## Функции надежности для отдельных видов отказов машин

Анализ результатов испытаний позволил обосновать функции надежности для отдельных видов отказов и характеристики рассеяния этих распределений. Предложены формулы для пересчета оценок вероятности отсутствия отказа за время испытаний на оценки при назначенном ресурсе. Установлено, что увеличение времени испытаний позволяет сократить их объем. Еще большего сокращения объема испытаний можно добиться форсированием (утяжелением) их режима.

**Ключевые слова:** деградационные отказы, функции распределения, характеристика рассеяния, случайная величина, вероятностные бумаги, функции надежности, виды отказов.

An analysis of the test results allowed to substantiate the reliability functions for individual types of failures and the dispersion characteristics of these laws. Formulas are proposed for recalculating the estimates of the probability of no failure during the evaluation tests for the specified resource. It is determined, that an increase in test time reduces their volume. An even greater reduction in the volume of tests can be achieved by forcing (weighting) their regime.

**Keywords:** degradation failures, distribution functions, dispersion characteristic, random variable, probability paper, reliability functions, types of failures.

В данной статье, как и в статье [1], проанализированы результаты исследования по минимизации объема испытаний на надежность машин на стадии их разработки.

Машины перед сдачей в эксплуатацию подвергают приработке (эту операцию, как правило, выполняют для большинства машин ответственного назначения). Поэтому при соблюдении всех установленных норм проектирования, изготовления и эксплуатации причиной выхода машин из строя в эксплуатации в большинстве случаев являются деградационные отказы — отказы, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости. Для описания деградационных отказов чаще всего используют функции распределения  $F(x)$  случайной величины  $X$ : нормальную, логарифмически нормальную, Вейбулла.

Функция распределения, как известно, характеризует вероятность события  $X < x$ , где  $x$  — некоторая текущая переменная, в нашем случае параметр, определяющий работоспособность: наработка в часах, наработка в числах оборотов, температура и т. д. Под событием в теории надежности, как правило, понимается значение параметра, определяющего работоспособность, при котором произошел отказ изделия.

Функция распределения случайной величины близка к нормальной, если случайная величина представляет собой сумму большого числа независимых или слабо зависимых величин и при этом ни одна из них не доминирует над другими. Плотность вероятности случайной величины  $X$  при этом, как известно, имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{S_x \sqrt{2\pi}} e^{-(x-x_0)^2/2S_x^2},$$

где  $x_0$  и  $S_x$  — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

В качестве характеристики рассеяния случайной величины часто используют коэффициент вариации — отношение среднего квадратического отклонения случайной величины  $X$  к ее среднему значению:

$$v(x) = S_x/x_0.$$

Чтобы получить функцию нормального распределения, пользуются таблицами. Значения функции зависят от двух параметров:  $x_0$  и  $S$ . Поэтому таблицы получаются громоздкими. Можно обойтись короткими таблицами, если вместо функции  $F(x)$  рассматривать функцию нормального распределения  $F_0(u_p)$ , математическое ожидание которой равно нулю, а среднее квадратическое отклонение — единице (нормированное и центрированное нормальное распределение). Для такого распределения плотность

$$f(u_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u_p^2/2}$$

и функция зависят от одного параметра  $u_p$ , называемого квантилью нормального распределения. Функция нормального распределения  $F_0(u_p)$  приведена в табл. 1 [2]. Чтобы от функции  $F(x)$  перейти к функции  $F_0(u_p)$ , необходимо сделать подстановку

$$u_p = \frac{x - x_0}{S_x}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что квантиль нормального распределения — это разность значений случайной величины и ее математического ожидания в долях среднего квадратического отклонения.

Размеры детали при ее изготовлении не удается выдержать абсолютно точными. При обмере партии деталей всегда обнаруживается рассеяние их размеров, которое, как показывает практика, обычно близко к нормальному распределению. Считается, что поле допуска размера покрывает шесть средних квадратических отклонений  $S_x$ . Таким образом, рассеяние размера  $X$  детали укладывается в поле допуска с вероятностью  $F_0\left(-3u_p < \frac{x - x_0}{S_x} < 3u_p\right) = 0,997$ .

При логарифмически нормальном распределении логарифм случайной величины распределен по нормальному закону. Достоинством такого распределения по сравнению с нормальным является возможность описания им распределения существенно положительных случайных величин, например наработки до отказа. Оно достаточно хорошо аппроксимирует результаты усталостных испытаний и рассеяние наработок до отказа, вызванного каким-либо процессом старения материала. Логарифмически нормальным распределением можно описывать распределение случайной величины, представляющей собой произведение значительного числа исходных случайных величин, среди которых ни одна не превалирует над другими. Плот-

ность распределения случайной величины  $X$  имеет вид [3]:

$$f(x) = \frac{1}{2,3xS_{\lg x}\sqrt{2\pi}} e^{-[\lg x - (\lg x)_0]^2 / 2S_{\lg x}^2},$$

где  $(\lg x)_0$ ,  $S_{\lg x}$  — параметры распределения.

Функцию нормального распределения  $F(\lg x)$  логарифма случайной величины  $X$  можно найти по табл. 1 в зависимости от значения квантили

$$u_p = \frac{[\lg x - (\lg x)_0]}{S_{\lg x}}.$$

Распределение Вейбулла наряду с логарифмически нормальным распределением используют для описания наработки до отказа по усталостным разрушениям. Им описывают, например, распределение наработки подшипников качения до отказа, происходящего из-за усталостного выкрашивания контактирующих поверхностей. Плотность распределения Вейбулла записывается в виде:

$$f(x) = \frac{Mx^{M-1}}{x_0} e^{-x^M/x_0},$$

где  $M$ ,  $x_0$  — параметры формы и масштаба.

Функция распределения Вейбулла имеет вид:

$$F(x) = 1 - e^{-x^M/x_0}.$$

В теории надежности пользуются функциями надежности наработки до отказа  $P(x)$  [4] (функция надежности характеризует вероятность события  $X \geq x$ ), которые связаны с функциями распределения  $F(x)$  выражением

$$P(x) = 1 - F(x).$$

Таблица 1

Нормальная функция распределения случайной величины с математическим ожиданием 0 и средним квадратическим отклонением 1

$u_p$	$F_0(u_p)$	$u_p$	$F_0(u_p)$	$u_p$	$F_0(u_p)$	$u_p$	$F_0(u_p)$
0,000	0,5000	0,842	0,8000	1,800	0,9641	2,652	0,9960
0,100	0,5398	0,900	0,8159	1,881	0,9700	2,700	0,9965
0,126	0,5500	1,000	0,8413	2,000	0,9772	2,748	0,9970
0,200	0,5793	1,036	0,8500	2,054	0,9800	2,800	0,9974
0,253	0,6000	1,100	0,8643	2,100	0,9821	2,878	0,9980
0,300	0,6179	1,200	0,8849	2,170	0,9850	2,900	0,9981
0,385	0,6500	1,282	0,9000	2,200	0,9861	3,000	0,9987
0,400	0,6554	1,300	0,9032	2,300	0,9893	3,090	0,9990
0,500	0,6915	1,400	0,9192	2,326	0,9900	3,291	0,9995
0,524	0,7000	1,500	0,9332	2,400	0,9918	3,500	0,9998
0,600	0,7257	1,600	0,9452	2,409	0,9920	3,719	0,9999
0,674	0,7500	1,645	0,9500	2,500	0,9938	3,890	0,9999
0,700	0,7580	1,700	0,9554	2,576	0,9950	3,891	1,0000
0,800	0,7881	1,751	0,9600	2,600	0,9953	4,000	1,0000

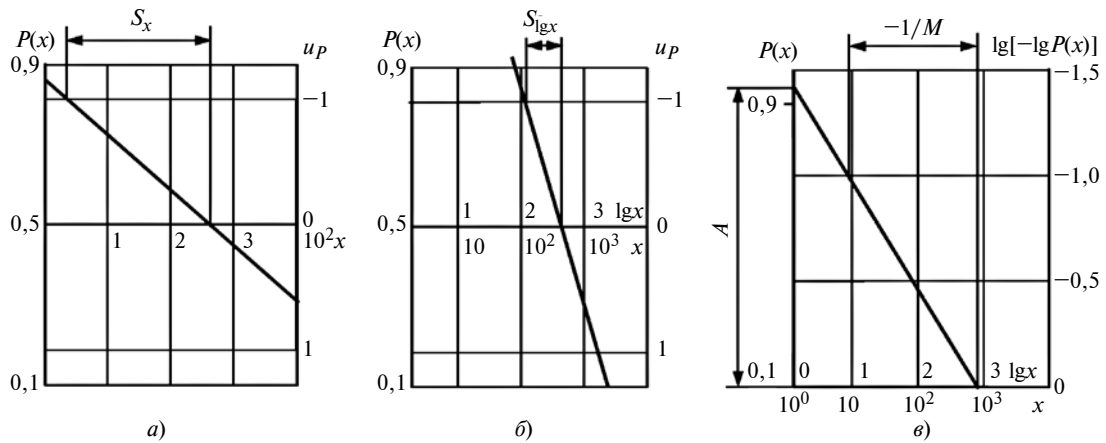


Рис. 1. Вероятностные бумаги для функций надежности: нормальной (а); логарифмически нормальной (б); Вейбулла (в)

Для графического представления функций надежности часто используют вероятностные бумаги, где по осям абсцисс и ординат выбраны такие шкалы, при которых график функции надежности представляется в виде прямой [5]. На вероятностных бумагах для нормальной и логарифмически нормальной функций надежности по оси абсцисс откладывают соответственно случайную величину и ее логарифм, а по оси ординат — квантиль нормального распределения в линейном масштабе (рис. 1, а, б). На этих бумагах среднее квадратическое отклонение  $S_x$  и параметр  $S_{lgx}$  случайной величины  $X$  есть разности значений случайной величины и ее логарифма, определенные при  $u_p = 0$  и  $u_p = -1$ .

Функция надежности Вейбулла графически изображается в виде прямой, если по оси абсцисс откладывать  $lgx$ , а по оси ординат величину  $lg[-lg P(x)]$  (рис. 1, в). В этих координатах значение параметра формы  $M$  можно определить, исходя из того, что  $1/M$  есть разность значений оси абсцисс при  $lg[-lg P(x)] = 0$  и  $lg[-lg P(x)] = -1$ . Параметр масштаба  $x_0$  можно оценить как  $x_0 = A - 0,362$ , где коэффициент  $A$  находится из графических построений (см. рис. 1, в).

Учитывая, что отказы машин в эксплуатации деградиационные, объем испытаний машин на надежность можно сократить увеличением длительности испытаний по сравнению с назначенным ресурсом, прогнозированием изменения в процессе испытаний параметра, определяющего работоспособность, и ускорением испытаний форсированием их режима. Под объемом испытаний будем понимать произведение числа испытываемых изделий на длительность их испытаний.

**Сокращение объема испытаний увеличением их длительности.** В промышленности часто применяют способ сокращения объема испытаний увеличением их длительности с последующим пересчетом оценки надежности с времени испытаний на назначенный ресурс, пользуясь общими сведениями

о функции надежности наработки до отказа для машины в целом. Такой способ не точен. Поясним это утверждение рассмотрением результатов испытаний, взятых из практики [6–8].

Заданный ресурс электродвигателя Г31 составляет  $t = 400$  ч. Испытаны на надежность 48 двигателей до отказа. Испытания прекратили через 1500 ч после отказа половины из них. Оказалось, что 23 отказа вызваны старением пластичного смазочного материала в подшипниках, а один отказ возник вследствие пробоя изоляции обмотки. Результаты испытаний представлены на рис. 2 в координатах нормальной вероятностной бумаги, где по оси абсцисс отложена наработка до отказа, а по оси ординат — квантиль нормального распределения.

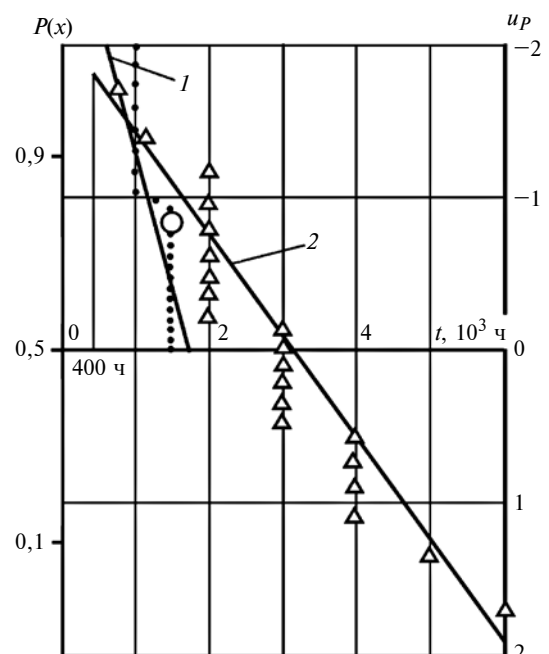


Рис. 2. В координатах нормальной вероятностной бумаги результаты испытаний [5–7]:

1 — электродвигателей Г31 (● — отказ подшипника, ○ — отказ обмотки); 2 — их обмоток (Δ — отказ обмотки)

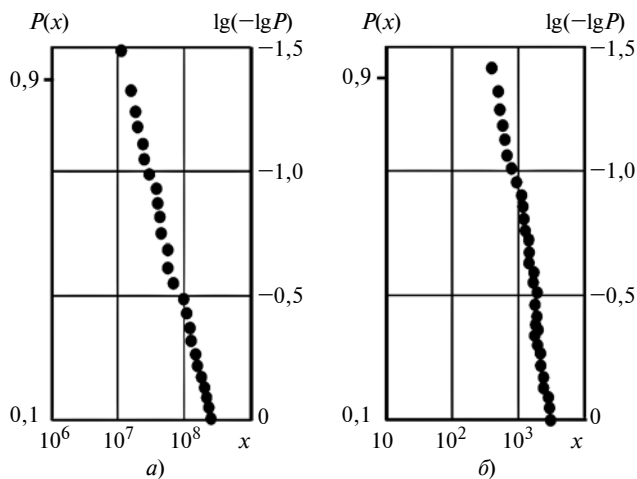


Рис. 3. Результаты испытаний на контактную выносливость радиальных шариковых подшипников 6309 [9] (а) и сферических роликовых подшипников 3518 [10] (б):

(а)  $x$  — наработка в числах оборотов; (б)  $x$  — наработка в часах

Расположение экспериментальных точек позволяет провести прямую  $l$  и получить для заданного ресурса оценку вероятности безотказной работы электродвигателя, равную 0,99 при  $t = 400$  ч, полагая, что она лимитируется надежностью подшипников.

Последующее изучение статистических данных об отказах этого электродвигателя в эксплуатации показало, что вероятность его безотказной работы ниже полученной оценки и отказы связаны в основном с пробоем изоляции обмотки. Для выяснения причин этого явления были проведены дополнительные испытания 21 электродвигателя до отказа их обмоток. Результаты испытаний представлены на рис. 2 прямой 2. Значение ее ординаты при  $t = 400$  ч дает оценку вероятности безотказной работы 0,96. Следовательно, хотя средний ресурс обмоток выше, чем у подшипников, рассеяние отказов обмоток по времени значительнее, вследствие чего вероятность безотказной работы двигателя не может превысить  $P(t) = 0,96$ , а отказы обмоток в течение заданного ресурса должны превалировать над отказами подшипников.

Можно было бы показать, что применение логарифмически нормального или иного распределения для описания функции надежности наработки до отказа машины не устранило бы ошибочного вывода, что надежность электродвигателя определяется подшипниковым узлом. Ошибка объясняется тем, что одним распределением невозможно описать наработки до отказов, вызванных разными физическими явлениями. Основное внимание было уделено отказу, определяющему средний ресурс двигателя, а возможность остальных видов отказов игнорировалась. Поэтому далее будем анализировать не функции надежности наработки до отказа для машины в целом, а функции надежности наработки до отдельных видов отказов.

На рис. 3, а в координатах вероятностной бумаги Вейбулла нанесены точками заимствованные из работы Нимана [9] результаты испытаний на контактную выносливость выборки из 30 радиальных шариковых подшипников 6309 (соответствуют отечественному подшипнику 309). Подшипники изготовлены из обычной подшипниковой закаленной стали. Как видно из рис. 3, все точки укладываются на прямую, что указывает на справедливость для подшипников качения функции надежности Вейбулла. Анализируя угол наклона прямой, заключаем, что параметр формы этой функции  $M \approx 1,11$ .

В работе [10] отмечено, что параметр формы повышается для подшипниковой стали, выплавленной методом вакуумной дегазации или в вакууме, и его, как правило, принимают равным 1,5. На рис. 3, б в координатах вероятностной бумаги Вейбулла нанесены точками заимствованные из работы [10] результаты испытаний на контактную выносливость выборки из 40 сферических роликовых подшипников 3518. Видно, что все точки укладываются на прямую. Анализируя угол наклона прямой, заключаем, что параметр формы функции надежности Вейбулла  $M \approx 1,6$ .

На рис. 4, а в координатах нормальной вероятностной бумаги нанесены точками 1 наработки  $t$  до отказа семнадцати электродвигателей КН-22В (вращающий момент на валу  $0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) [6, 7] при их испытаниях на надежность. Испытания проводились циклами при частоте вращения  $7000 \text{ мин}^{-1}$ . Максимальная температура составляла  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , отказ — короткое замыкание обмоток (класс изоляции обмоток А, их перегрев достигал  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ). На том же рисунке точками 2 нанесены наработки до отказа двадцати электродвигателей постоянного тока ДП-1-26 (вращающий момент на валу менее  $0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ). Отказы произошли вследствие предельного износа комплектов щеток (отказали 6 комплектов). Испытания проводили циклами при частоте вращения  $7000 \text{ мин}^{-1}$ . Максимальная темпе-

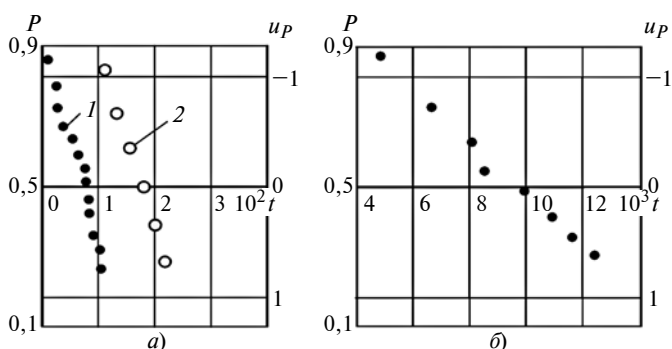
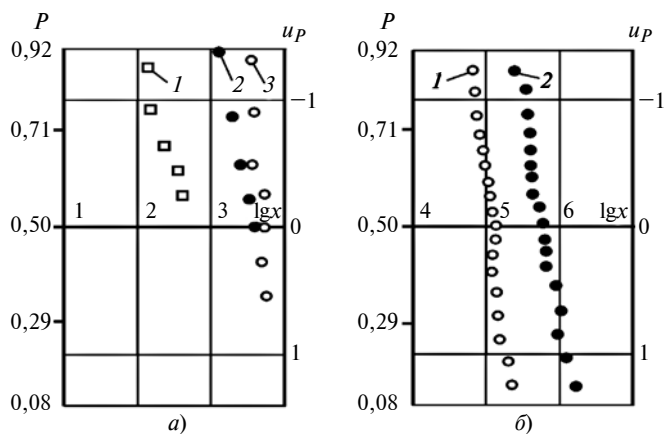


Рис. 4. В координатах нормальной вероятностной бумаги результаты испытаний:

а — на надежность обмоток электродвигателей КН-22В (1) и на долговечность по износу щеток электродвигателей ДП-1-26 (2); б — на долговечность по износу коллектора электродвигателей ПСМ [6, 7]



**Рис. 5. Функции надежности в координатах логарифмически нормальной вероятностной бумаги:**

*a)*  $x$  — наработка в часах, 1 — эрозия контактов центробежного регулятора [6, 7], 2 — отказы подшипников А308ЕШ3 по старению смазочного материала [6, 7], 3 — отказы подшипников В23ЮТ по старению смазочного материала [6, 7]; *б)*  $x$  — наработка в числах циклов нагружения, 1 — появление макротрещины у образца из сплава В-95 [11], 2 — появление макротрещины у образца из стали 45 [12]

ратура составляла  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 4, *б* в тех же координатах представлены наработки до отказа (отказ восьми коллекторов) по износу коллекторов девяти электродвигателей постоянного тока ПСМ (вращающий момент на валу около  $5\text{ Н}\cdot\text{м}$ ), полученные в условиях эксплуатации при частоте вращения  $3000\text{ мин}^{-1}$ .

По результатам обработки графиков на рис. 4 получены следующие коэффициенты вариации  $v(t)$  наработки до отказа:  $0,78$  по пробую изоляции обмотки;  $0,39$  по износу комплекта щеток;  $0,39$  по износу коллектора.

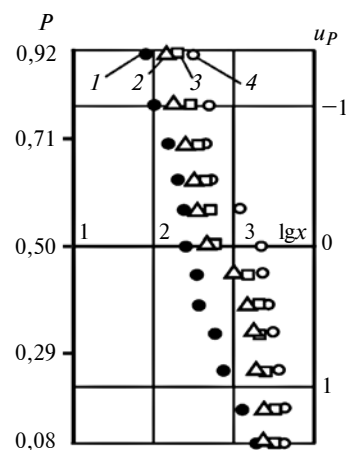
На рис. 5, *а* в координатах логарифмически нормальной вероятностной бумаги приведены наработки до отказа машин: по эрозии контактов центробежного регулятора (применительно к электродвигателям с вращающим моментом на валу  $0,2\text{ Н}\cdot\text{м}$ ) [6, 7]; по старению пластичного смазочного материала в подшипниках А308ЕШ3 (применительно к электродвигателям с вращающим моментом на валу  $16\text{ Н}\cdot\text{м}$ , подшипники которых смазываются пластичным смазочным материалом) [6, 7]; по старению пластичного смазочного материала в подшипниках В23ЮТ (применительно к электродвигателям с вращающим моментом на валу менее  $0,1\text{ Н}\cdot\text{м}$ , подшипники которых смазываются пластичным смазочным материалом) [6, 7]. На рис. 5, *б* в тех же координатах приведены наработки до появления макротрещины образцов: из сплава В-95 при консольном изгибе (напряжение  $300\text{ МПа}$ ) [11]; из стали 45 при плоском изгибе (напряжение  $355\text{ МПа}$ , диаметр образца  $15\text{ мм}$ ) [12]. По результатам обработки графиков на рис. 5 получены значения параметра функции  $S_{lgx}$ :  $0,55$  — по эрозии контактов;  $0,35$  — по старению пластичного смазочного мате-

риала в подшипниках;  $0,25$  — по появлению макротрещины у образцов при испытаниях их на изгибную выносливость.

Следует заметить, что характеристики рассеяния функций надежности наработки до отказов отдельных видов достаточно стабильны, о чем свидетельствует, например, рис. 6, на котором представлены результаты испытаний при частоте вращения  $8000\text{ мин}^{-1}$  четырех выборок по 12 подшипников в каждой с двумя видами пластичного смазочного материала и при двух температурах [13]. По результатам обработки графиков на рис. 6 значения параметра функции  $S_{lgx}$  для разных пластических смазочных материалов и разных температур получены практически одинаковыми (близкими  $0,4$ ).

При обобщении статистических данных по рассеянию наработок до отдельных видов отказов следует учитывать, что применительно к повреждениям усталостного характера (до появления первой трещины) справедливы утверждения: 1) несущие способности элементарных объемов детали независимы друг от друга; 2) отказ детали возникает при разрушении хотя бы одного элементарного объема. При этом, если представить деталь в виде  $n$ -звенной цепи и принять несущую способность  $R$  элементарного объема распределенной по нормальному закону, то несущая способность детали будет распределением минимального члена выборки, состоящей из  $n_k$  компонент [8]. Причем с увеличением  $n_k$  рассеяние случайной величины уменьшается (рис. 7).

Оказывается, что аналогия с  $n$ -звенной цепью может быть распространена на отказы по контактной прочности и изнашиванию. Эту аналогию можно распространить и на отказы обмоток электрических машин. По результатам исследований работы [14] можно сделать вывод, что большинство де-



**Рис. 6. Функции надежности для пластичных смазочных материалов в подшипнике 204 при  $n = 8000\text{ мин}^{-1}$  [13] в координатах логарифмически нормальной вероятностной бумаги:**

$x$  — наработка в часах; смазочные материалы: ОКБ-127 при температуре  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1), 1-13 при температуре  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2), ОКБ-127 при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (3), 1-13 при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (4)

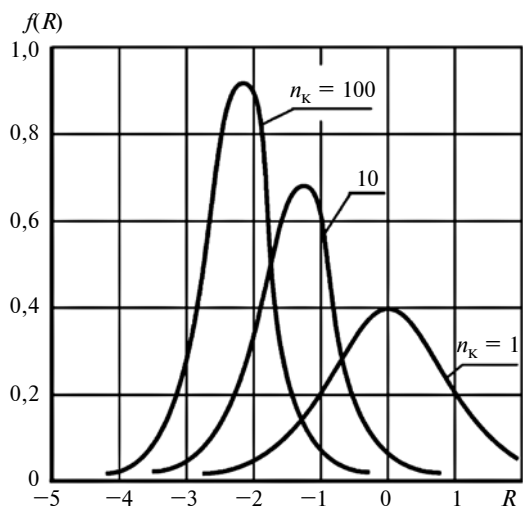


Рис. 7. Плотности распределения несущей способности  $R$  цепи в зависимости от числа  $n_k$  ее компонент

струкционных видов отказов характеризуется рассеянием наработки до отказа, уменьшающемся с увеличением размера опасного сечения детали. Этот вывод учтен в значениях параметров, характеризующих рассеяние ресурса (табл. 2).

**Пересчет оценок вероятности отсутствия отдельных видов отказов с времени испытаний на назначенный ресурс.** При пересчете оценок с большего времени  $t_{и}$  испытаний на меньшее — заданный ресурс  $t$ , можно пользоваться функциями надежности для отдельных видов отказов (см. табл. 2) и характеристиками рассеяния ресурса, установленными обобщением статистических данных по отказам.

**Сокращение длительности испытаний форсированием их режима.** Обычно ресурс машины зависит от уровня возникающих в деталях напряжений, температуры ее узлов и других факторов. Если характер этой зависимости изучен, то длительность испытаний можно сократить в  $k_y$  раз с времени  $t_{и}$  до времени  $t_{ф}$  форсированием их режима:

$$k_y = t_{ср} / t_{ср.ф},$$

где  $k_y$  — коэффициент ускорения;  $t_{ср}$ ,  $t_{ср.ф}$  — средние наработки до отказа в нормальном и форсированном режимах.

Значения  $k_y$  вычисляют по зависимостям [1], связывающим ресурс с форсирующими факторами.

Для отказов, не связанных с выработкой ресурса (заклинивание из-за температурных деформаций, хрупкое разрушение детали при минусовой температуре и др.), сокращения объема испытаний можно достигнуть выявлением запаса по определяющему работоспособность параметру (температуре и др.), проводя испытания в форсированном по этому параметру режиме. При этом достаточно располагать результатами краткосрочных испытаний. Соотношение между предельным  $x_{пр}$  и действ-

ствующим  $x_{д}$  значениями параметра в предположении их нормальных распределений представим в виде

$$x_{0пр} - x_{0д} + u_p S_x = 0,$$

где  $S_x = (S_{пр}^2 + S_{д}^2)^{0,5}$ ;  $S_{пр}$ ,  $S_{д}$  — средние квадратические отклонения параметров  $x_{пр}$ ,  $x_{д}$ ;  $x_{0пр}$ ,  $x_{0д}$  — средние значения параметров  $x_{пр}$ ,  $x_{д}$ .

Полученное выражение позволяет получить формулу пересчета параметра  $x$  с форсированного режима на номинальный.

Если параметр измерен перед испытаниями  $x_{нi}$  и после их окончания  $x_i$  и, кроме того, известно предельное значение  $x_{пред.i}$  параметра, то ресурс  $t_i$  по  $i$ -му возможному виду отказа можно прогнозировать в предположении линейного изменения во времени значения этого параметра [1].

Знание функций надежности для отдельных видов отказов и характеристик их рассеяния либо предположение, что справедлива линейная зави-

Таблица 2

Функции надежности для отдельных видов отказов и характеристики рассеяния ресурса

Функция надежности [характеристика рассеяния ресурса]	Вид отказа	Характеристика рассеяния ресурса при вращающем моменте на валу, Н · м	
		до 0,2	свыше 0,2
Нормальная $[v(t)]$	Предельный износ деталей	0,40	0,30
	Предельный износ щеток электрических машин	0,40	0,35
	Короткое замыкание в обмотках электродвигателей	0,80	0,40
	Усталостное разрушение резины	0,40	
Логарифмически нормальная $[S_{lg}]$	Усталостные разрушения металлических деталей	0,30	
	Отказы вследствие ползучести материалов	0,30	
	По старению жидкого смазочного материала, пропитывающего металло-керамические подшипники скольжения	0,40	
	По старению пластичного смазочного материала подшипников качения	0,40	0,33
	Эрозии электрических контактов	0,40	
Вейбулла $[M]$	Усталостные повреждения подшипников, изготовленных из обычной подшипниковой закаленной стали	1,10	
	Усталостные повреждения подшипников, изготовленных из стали, выплавленной с помощью метода вакуумной дегазации или в вакууме	1,50	



Формулы для пересчета

Функция надежности или зависимость	Формула
Нормальная для ресурса	$u_p = \frac{t - t_{и}}{v_t t_{и}} + \frac{u_{p_{и}} t}{k_y t_{ф}}$
Логарифмически нормальная для ресурса	$u_p = \frac{\lg t - \lg(k_y t_{ф})}{S_{\lg t}} + u_{p_{и}}$
Вейбулла для ресурса	$\ln[P(t)] = \left(\frac{t}{k_y t_{ф}}\right)^M \ln[P(t_{и})]$
Нормальная для параметра работоспособности	$u_p = \frac{x_{д} - x_{д.ф}}{S_x} + u_{p_{и}}$
Линейное изменение во времени параметра работоспособности	$t_i = t_{ф} \frac{x_{н.i} - x_{пред.i}}{x_{н.i} - x_i}$

симость от времени значения параметра, определяющего работоспособность, позволяют предложить формулы для пересчета оценок вероятности отсутствия отказа с времени испытаний  $t_{и}$  на назначенный ресурс  $t$  и с форсированного режима испытаний на номинальный (табл. 3).

В табл. 3 обозначены:  $v_t$  — коэффициент вариации ресурса;  $P(t_{и})$  — вероятность отсутствия отказов в течение времени испытаний;  $u_{p_{и}}$  — квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности  $P(t_{и})$ ;  $t_{ф}$  — время испытаний, режим которых может быть или номинальным, или форсированным.

Главный конструктор авиационных и ракетных двигателей Н. Д. Кузнецов в работе [15] изложил методику обеспечения надежности авиационной техники, применявшуюся на его предприятии (г. Самара) в восьмидесятых годах прошлого века: двигатели и самолеты запускали в серийное производство только после того, как по результатам стендовых испытаний узлов, многие из которых проводились в форсированном режиме, была установлена их практическая безотказность и лидерные самолеты (2÷3 экземпляра), которыми управляли летчики-испытатели, обеспечили налет каждого самолета без отказа по тройному назначенному ресурсу. Такая методика позволяла предприятию-изготовителю постоянно дорабатывать конструкцию и повышать ее ресурс, а также быстро перестраивать производство на другие модификации машин. В нашей работе изложен близкий подход к обеспечению надежности, отличающийся от описанного в работе [15] тем, что по каждому узлу планируется объем испытаний, необходимый не для подтверждения практической безотказности, а для выполнения заданных требований к машине по ее надежности, что исключает избыточность объема испытаний на надежность для некоторых узлов и тем самым экономит ресурсы предприятия-изготовителя.

Следует отметить, что авиационный двигатель с редуктором пятого поколения НК-93, разработан-

ный Н. Д. Кузнецовым в девяностые годы прошлого века для гражданских самолетов Ил-96, Ту-204, Ту-214, обеспечивал лучшие в мире показатели по дальности полета, экономичности, шуму, экологичности.

В заключение следует сказать, что анализом результатов испытаний обоснованы функции надежности для отдельных видов отказов и характеристики рассеяния этих законов. Предложены формулы для пересчета оценок вероятности отсутствия отказа за время испытаний на оценки при назначенном ресурсе. Так как отказы машин в основном относятся к деградиционным, то увеличение времени испытаний позволяет сократить их объем. Еще большего сокращения объема испытаний можно добиться форсированием их режима.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Иванов А. С.** Испытания машин на надежность при их разработке // Вестник машиностроения. 2019. № 10. С. 13—17.
2. **Справочник** по вероятностным расчетам / Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копейкин и др. М.: Воениздат, 1970. 536 с.
3. **Шор Я. Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Советское радио, 1962. 552 с.
4. **Кроль И. А.** Оценка надежности комплексных систем по результатам разнородных испытаний. Труды ВНИИЭМ. Т. 33. М.: ВНИИЭМ, 1970. С. 40—87.
5. **Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б.** Модели отказов. М.: Советское радио, 1966. 166 с.
6. **Решетов Д. Н., Иванов А. С.** Расчетно-экспериментальный метод оценки надежности машин по отдельным критериям // Вестник машиностроения. 1973. № 2. С. 3—7.
7. **Решетов Д. Н., Иванов А. С.** Развитие расчетно-экспериментального метода оценки надежности по критериям // Вестник машиностроения. 1976. № 3. С. 6—9.
8. **Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З.** Надежность машин: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
9. **Niemann G., Winter H., Höhn B.-R.** Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 3 Auflage. Berlin: Springer, 2001. 903 s.
10. **Кошель В. М.** Подшипники качения. Минск: Наука и техника, 1993. 255 с.
11. **Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машгиз, 1963. 452 с.
12. **Когаев В. П.** Усталость и несущая способность узлов и деталей машин при стационарном и нестационарном переменном нагружении: Заочные курсы усовершенствования инженеров-конструкторов. М.: НТО Машпром, 1966. 132 с.
13. **Карасик П. И., Бронцакая Л. Г.** Сравнительная работоспособность смазок общего назначения // Труды ВНИПП. 1961. № 4. С. 64—67.
14. **Иванов А. С.** Масштабный эффект при рассмотрении изгибного и контактного сопротивлений усталости, а также трения и износа // Вестник машиностроения. 1997. № 5. С. 25—30.
15. **Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И.** Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.

## Математическая модель определения профиля червячных фрез

На базе численного метода разработана математическая модель, позволяющая профилировать червячные фрезы для обработки деталей с винтовыми поверхностями. В математическую модель включен модуль, генерирующий матрицы пространственного преобразования систем координат. Приведен алгоритм построения модели профиля червячной фрезы. Профилирование осуществляется за один этап без определения профиля сопряженной косозубой рейки.

**Ключевые слова:** червячная фреза, профилирование, формообразование, математическая модель, обкатка, численный метод.

On the basis of the numerical method, a mathematical model is developed that allows profiling worm mills for machining parts with screw surfaces. The mathematical model includes a module that generates spatial transformation matrices of coordinate systems. An algorithm for constructing a worm cutter profile model is given. Profiling is carried out in one step without determining the profile of the mating helical rack.

**Keywords:** worm mill, profiling, shaping, mathematical model, running-in, numerical method.

В настоящее время детали с винтовыми поверхностями обрабатываются в основном с помощью дискового инструмента. Если у детали несколько винтовых поверхностей, более эффективным является использование червячных фрез. Однако проектирование червячных фрез для обработки деталей с винтовыми канавками произвольного профиля — сложная и до конца не решенная задача.

Используемый при профилировании червячных зуборезных фрез рядом авторов [1] метод, построенный на свойстве общей нормали, состоит из двух этапов, на первом из которых определяется профиль сопряженной косозубой рейки. Кроме того, он неприменим, если положение нормали определить невозможно, например, если исходный профиль задан координатами отдельных точек или пространственной кривой, а также для случаев обработки более сложных поверхностей, например конических винтовых.

Решение поставленной задачи было найдено в рамках подхода к вопросам профилирования, реализуемого на базе численных методов, которые позволяют определить профиль червячной фрезы в один этап.

Разработанная система включает четыре основных модуля: формирования модели обрабатываемой

поверхности детали; исследования модели обрабатываемой поверхности детали; формирования модели инструментальной поверхности; исследования модели инструментальной поверхности.

Для решения конкретных производственных задач достаточно использовать один или два модуля, а для предпроектного исследования нового вида инструмента для обработки ответственной детали сложного профиля наиболее эффективна система с полным набором модулей.

Первый модуль [2] осуществляет формализацию численного представления точек исходной поверхности детали в системе координат, связанной с производящей поверхностью режущего инструмента. Исходными данными являются:

- 1) координаты  $x_i$ ,  $y_i$  и число  $i$  точек профиля детали;
- 2) число  $f$  преобразований систем координат и номер  $n$  (порядок) каждого преобразования;
- 3) угловые  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$  и линейные  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  перемещения, характеризующие преобразования систем координат.

Основой модуля является исходная матрица:

$$MO = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_x)\cos(\alpha_z) & \sin(-\alpha_x) & \sin(\alpha_z) & A_x \\ \sin(\alpha_x) & \cos(\alpha_y)\cos(\alpha_x) & \sin(-\alpha_y) & A_y \\ \sin(-\alpha_z) & \sin(\alpha_y) & \cos(\alpha_z)\cos(\alpha_y) & A_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Программа, реализующая первый модуль, позволяет в автоматическом режиме из исходной матрицы  $MO$  (1) сформировать матрицы  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$ ,  $M4$  последовательных преобразований систем координат от профиля детали к искомой поверхности инструмента в соответствии с заданным числом  $f$ , номером  $n$  преобразований систем координат и численным значением, характеризующим каждое преобразование.

На рис. 1 приведена схема профилирования червячной фрезы для обработки детали с винтовой канавкой произвольного профиля, которая включает четыре преобразования систем координат ( $f = 4$ ) в приведенной ниже последовательности.

1. Перемещение вдоль оси  $X$  ( $n = 1$ ) системы координат  $O_0X_0Y_0Z_0$  на расстояние  $A_x = -r_{\text{НК}}\varphi$ , где  $r_{\text{НК}}$  — радиус начального цилиндра обрабатываемой детали, и согласованный поворот (обкатка) вокруг оси  $Z$  на угол  $\alpha_x = \varphi$ , являющийся переменной ве-

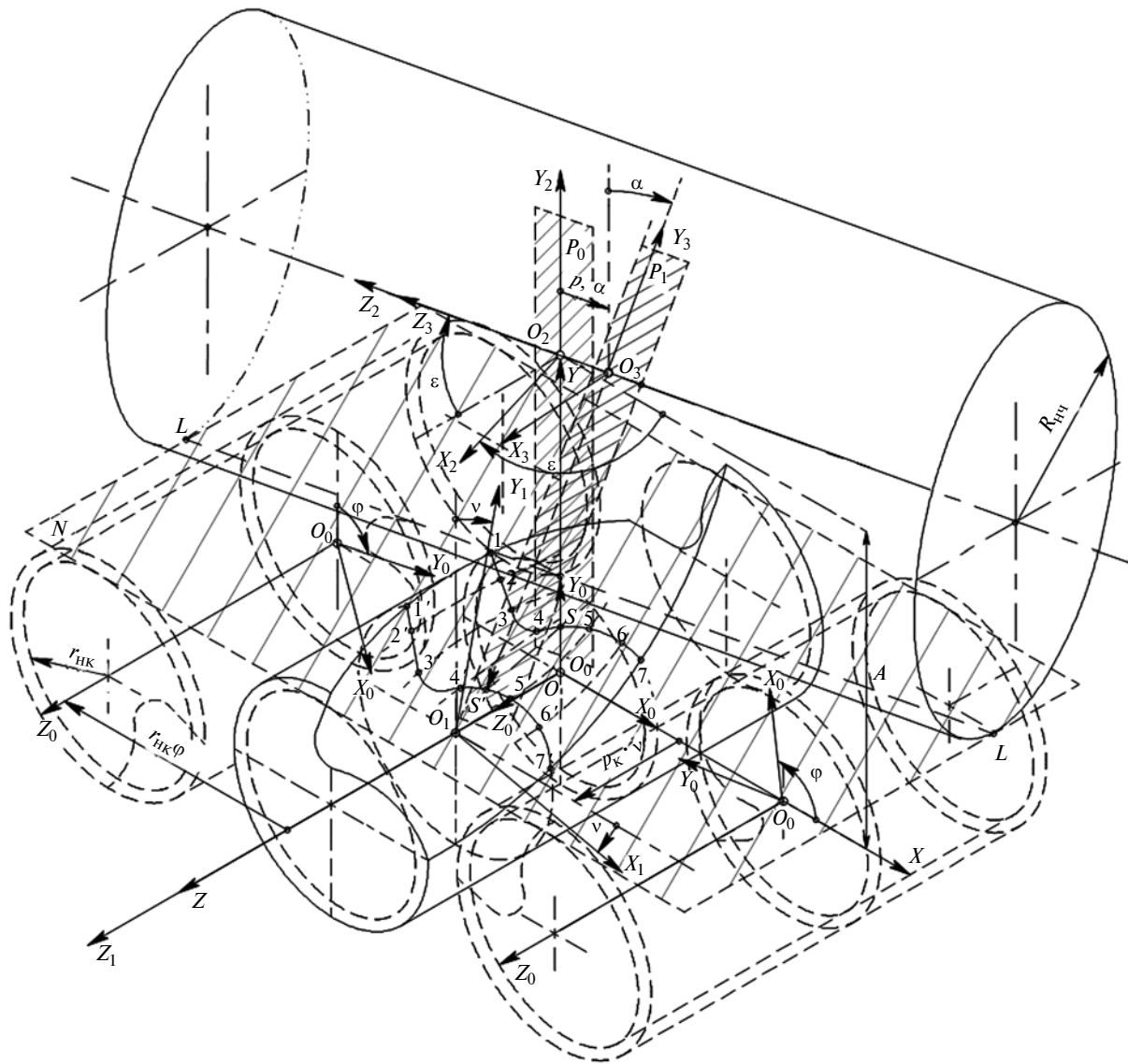


Рис. 1. Схема формирования пространственной численной модели червячной фрезы

личной, реализующей движение обкатки начального цилиндра обрабатываемой детали по плоскости  $N$ , касательной по линии  $L-L$  к начальному цилиндру червячной фрезы радиусом  $R_{НК}$ .

Программа, реализующая модуль, на основании приведенных исходных данных сформирует в соответствии с разработанным алгоритмом из исходной матрицы  $MO$  (1) матрицу преобразования  $M1$ :

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -r_{НК}\varphi \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

2. Поворот вокруг оси  $Z$  ( $n = 3$ ) системы координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  на угол  $\chi = -\nu$ , являющийся переменной величиной, реализующей винтовое движение, формирующее обрабатываемую поверхность

детали, и согласованное перемещение вдоль этой оси на расстояние  $Ax = -p_k\nu$ , где  $p_k = \frac{r_k}{\text{tg}\omega}$  ( $r_k$  — наружный радиус обрабатываемой детали,  $\omega$  — угол наклона винтовой канавки обрабатываемой детали).

В соответствии с разработанным алгоритмом матрица  $M2$  указанного преобразования будет иметь вид:

$$M2 = \begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p_k\nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

3. Перемещение вдоль оси  $Y$  ( $n = 2$ ) системы координат  $O_2X_2Y_2Z_2$  на расстояние  $Ay = -A = -(r_{НК} + R_{КЧ})$  и поворот на угол  $\chi = -\varepsilon$  скрещи-

вания осей червячной фрезы и обрабатываемой детали. Первый модуль сформирует на основании приведенных исходных данных из  $MO$  матрицу  $M3$ , которая будет иметь вид:

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -(r_{нк} + R_{нч}) \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

4. Поворот вокруг оси  $Z_2$  ( $n = 3$ ) системы координат  $O_3X_3Y_3Z_3$  на угол  $\alpha$ , являющийся переменной величиной, связанной с координатами  $x_{2i}$ ,  $y_{2i}$  текущей точки (например, для точки  $S'(x_{2s'}, y_{2s'})$ ,  $\text{tg}(\alpha) = x_{2s'}/y_{2s'}$ ), и согласованное перемещение вдоль этой оси на расстояние  $Az = p_{ч}\alpha$ , где  $p_{ч}$  — винтовой параметр червяка. В соответствии с раз-

работанным алгоритмом матрица  $M4$  указанного преобразования будет иметь вид:

$$M4 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_{ч}\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Результирующая численная модель  $MR$  является столбцевой матрицей и определяется выражением:

$$MR = \begin{pmatrix} x_{3i} \\ y_{3i} \\ z_{3i} \\ 1 \end{pmatrix} = M\Sigma \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $M\Sigma = M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1$ .

Указанные действия с матрицами (1)–(5) преобразований реализуются программно, в результате получается численная модель в виде столбцевой матрицы (6), у которой координата  $y_{3i}$  является расстоянием от оси  $Z_3$  до рассматриваемой точки  $i$  в совокупности указанных в пп. 1–4 перемещений и поворотов, а координата  $z_{3i}$  определяет расстояние до координатной плоскости  $O_3X_3Y_3$ .

Для определения профиля инструмента можно использовать следующий алгоритм профилирования.

1. Задается движение обкатки углом  $\varphi_j$  в диапазоне от  $+\varphi_{\max}$  до  $-\varphi_{\max}$  с шагом, величина которого устанавливается в зависимости от требуемой точности (среднее значение  $0,01\pi$ ).

2. Для каждого значения точки угла  $\varphi_j$  задается номер точки  $i$  с координатами  $x_i$ ,  $y_i$  (см. рис. 1;  $i = 1, \dots, 5$ ).

3. Для каждого угла  $\varphi_j$  и значения  $i$  задается изменение угла  $\nu$  в диапазоне от  $+\nu_{\max}$  до  $-\nu_{\max}$ , значение которого зависит от профиля детали, угла наклона винтовой канавки и радиуса начальной окружности червяка  $(0,1 \div 0,2)\pi$ . При этом точки  $i = 1, \dots, S, \dots, 7$  переходят в положение  $i = 1', \dots, S', \dots, 7'$ . Величина шага изменения угла  $\nu$  устанавливается в зависимости от требуемой точности (среднее значение  $0,01\pi$ ).

4. В результате перемещения, например, точки  $S$  в положение  $S'$  плоскость  $P_0$ , проходящая через нее, займет положение  $P_1$ , при этом плос-

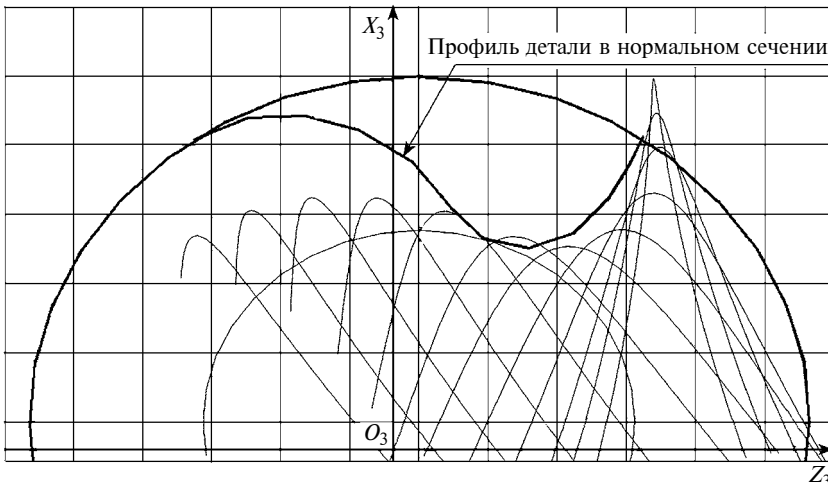


Рис. 2. Графическое решение численной модели исходной поверхности при параметре обкатки  $\varphi_j = \varphi_{\max}$

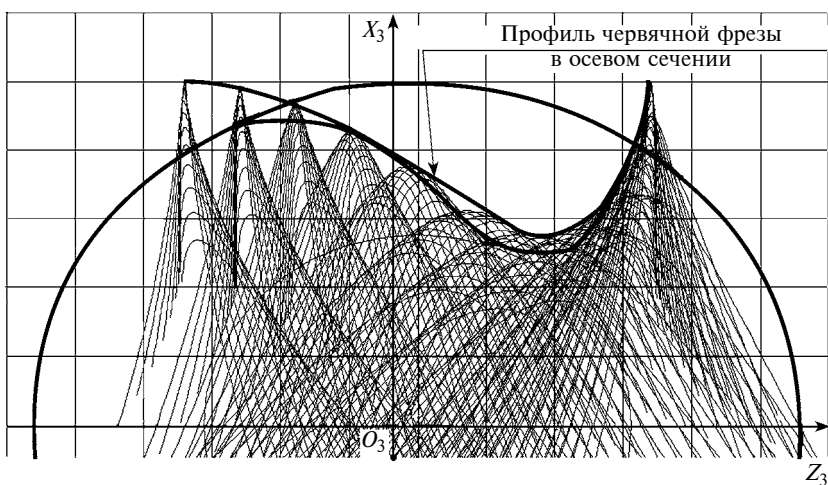


Рис. 3. Графическое решение численной модели профилирования червячной фрезы

## Гидравлический привод управления заслонкой водометного движителя плавающей гусеничной машины

В конструкции плавающей гусеничной машины предложено совместить гидравлический привод механизма управления заслонкой водометного движителя с механическим приводом управления ею на суше. Совмещенный привод управления не требует отдельных рычагов управления, имеет меньшую массу по сравнению с существующими механическими приводами и дополнен гидравлическим усилителем, что позволяет снизить необходимые усилия для управления заслонками водометных движителей.

**Ключевые слова:** водометный движитель, заслонка, привод управления, гидроцилиндр, золотник.

In the design of a floating track-type vehicle, it is proposed to combine the hydraulic drive of the control mechanism of the shutter of the water-jet propulsion with the mechanical drive to control it on land. The combined control drive does not require separate control levers, has a lower weight in comparison with existing mechanical drives and is supplemented with a hydraulic amplifier, which reduces the necessary effort to control the shutters of water jet propulsion devices.

**Keywords:** water-jet propulsion, shutter, control drive, hydraulic cylinder, valve.

В настоящее время большое внимание уделяется упрощению конструкции приводов управления, а также упрощению компоновки отделения управле-

ния плавающих гусеничных машин (ГМ), в которых помимо сухопутного движителя имеется движитель для плавания и соответствующие приводы управления [1]. В данной статье предлагается для плавающей ГМ совместить привод в механизме управления заслонкой (рис. 1) водометного движителя с механическим приводом управления ГМ на суше.

На рис. 2 представлен привод управления на суше для плавающей машины.

Для поворота на плаву и для закрывания водометных движителей машины при перемещении по суше в плавающих машинах, например, на советском танке ПТ-76, на каждом борту машины используются заслонки водометных движителей, поворачивающиеся вокруг оси. Управление заслонкой водометного движителя этой плавающей машины выполняется отдельным, независимым от привода управления поворотом машины на суше механическим приводом. На машине имеются два независимых друг от друга привода управления заслонкой: один — для правого борта, другой — для левого, и, соответственно, два независимых друг от друга привода управления механизмами поворота машины на суше.

Механический привод управления заслонкой танка ПТ-76 аналогично приводу управления машиной на суше состоит из рычагов управления заслонками, промежуточных мостиков, рычагов,



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 10)

кость повернется на угол  $\alpha$  и согласованно переместится от центра  $O_2$  до  $O_3$  на расстояние  $p_4\alpha$ .

В результате перечисленных действий для  $\varphi_j = \varphi_{\max}$  образуются кривые, представляющие собой линии пересечения линий  $1-1'$ ,  $2-2'$ , ...,  $S-S'$ , ...,  $7-7'$  (рис. 2) с плоскостью  $P_1$ , совершающей вокруг оси  $Z_3$  винтовое движение с винтовым параметром  $p_4$ .

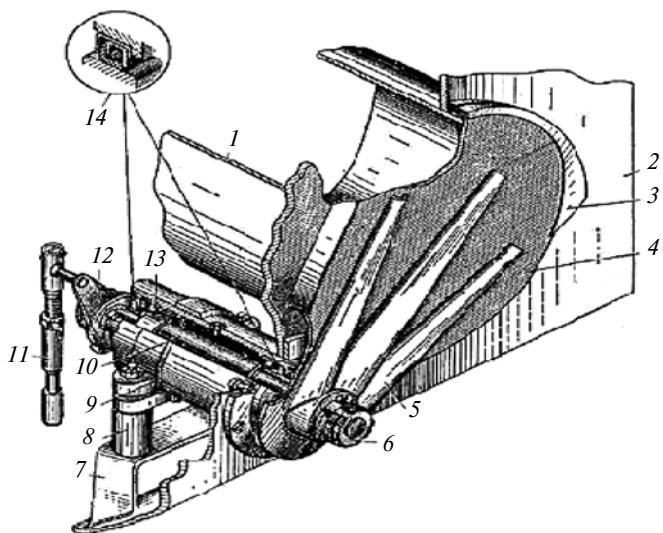
Вся совокупность кривых для полного диапазона  $\varphi_{\max} \leq \varphi_j \leq \varphi_{\max}$  изменения угла обкатки приведена на рис. 3. Реализованное программное построение огибающей кривых позволяет определить и построить искомый профиль червячной фрезы.

Предложенное решение использовано для профилирования и исследования червячных фрез с протуберанцем [3] и не имеет ограничений по форме и способу задания образующей и направляющей обрабатываемой винтовой поверхности детали.

Особенностью системы является то, что с ее помощью не только выполняются расчеты, позволяющие построить кривые и определить искомый профиль, но формируются математические зависимости с использованием исходной матрицы  $MO(1)$  и матриц преобразований, по которым и выполняются эти расчеты. При этом определение профиля червячной фрезы осуществляется в один этап без определения профиля сопряженной косозубой рейки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Лашнев С. И., Юликов С. И. Расчет и конструирование режущего инструмента с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1975. 391 с.
2. Петухов Ю. Е. Проектирование производящей инструментальной и исходной поверхностей на основе методов машинного моделирования: Дис. ... канд. техн. наук / МГТУ "СТАНКИН". 1984. 242 с.
3. Kolesov N. V., Petukhov Yu. E. The mathematical model of a hob with protuberances // Russian Engineering Research. 1995. V. 15. N 4. P. 71–75.



**Рис. 1. Заслонка водометного движителя:**

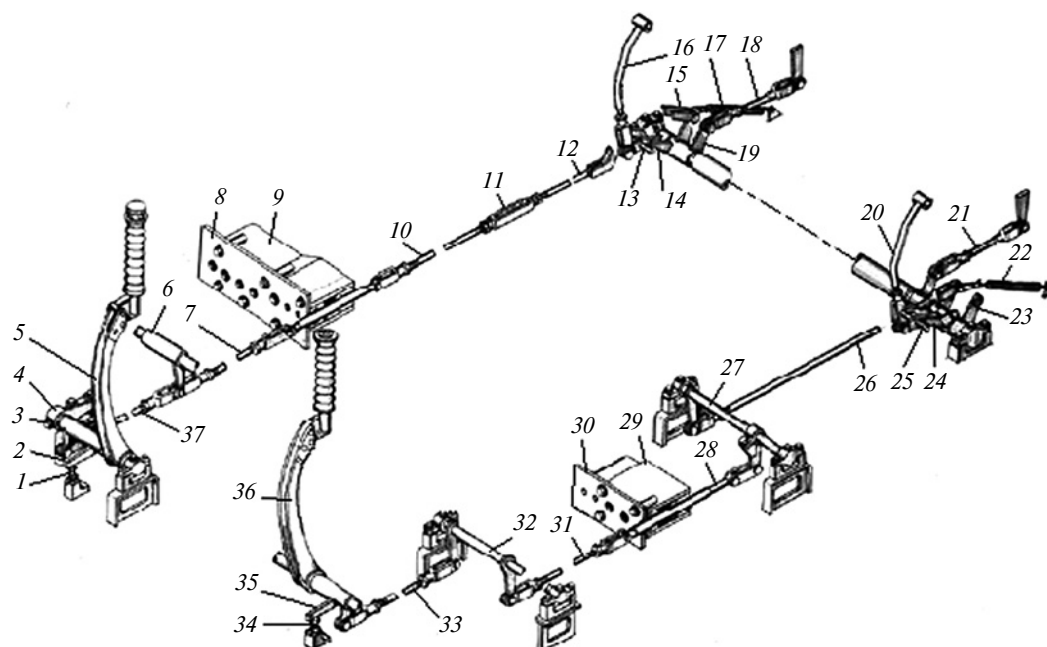
1 — кормовой патрубок; 2 — кормовой вертикальный лист; 3 — козырек заслонки; 4 — заслонка; 5 — ребро жесткости; 6 — гайка с контргайкой; 7 — кронштейн; 8 — бонка; 9 — бугель; 10 — валик заслонки; 11 — тяга; 12 — рычаг валика заслонки; 13 — радиально-упорный шарикоподшипник; 14 — самоподжимные сальники

валиков, соединительных тяг. При расположении трансмиссии и водометных движителей в корме машины, а механика-водителя с рычагами управления в ее носовой части трасса управления заслонками выполняется вдоль всей машины [2]. Привод управления заслонкой может быть тросовым. На рис. 3 показан тросовый привод управления заслонкой для плавающей машины.

Недостатком механического привода управления заслонкой водометного движителя танка ПТ-76 является наличие отдельного рычага управления заслонкой для управления поворотом машины на плаву на каждом борту, что увеличивает число органов управления машиной, усложняет компоновку приводов управления и отделения управления машиной, увеличивает массу машины. Кроме того, управление заслонкой механическим приводом без сервирования (усиления) требует значительных усилий на органах управления, что приводит к утомляемости механика-водителя. Усилие на рычаге управления закрыванием на суше водометной заслонки плавающей гусеничной машины массой  $7 \div 8$  т составляет  $70 \div 90$  Н.

Цель предлагаемого технического решения — уменьшение числа органов управления машиной, упрощение компоновки привода управления заслонкой и отделения управления машиной, снижение ее массы и усилий на органах управления заслонками машины.

Для достижения поставленной цели заслонки водометного движителя необходимо связать с приводом управления механизмом поворота машины. Данная связь обеспечивается применением гидропривода управления заслонкой, состоящего из задающего золотника и гидроусилителя с жесткой обратной связью по перемещению этого золотника. Оси гидроусилителя и задающего золотника расположены параллельно. Задающий золотник соединен поршнем силового цилиндра с заслонкой, а задающим элементом — с приводом управления



**Рис. 2. Привод управления на суше для плавающей машины:**

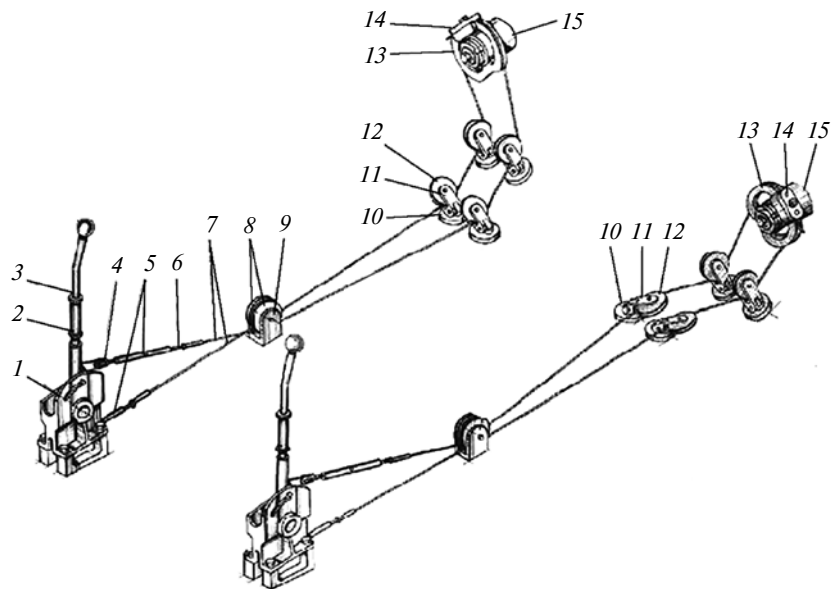
1, 34 — регулировочные болты; 2, 6, 14, 19, 23, 24, 35 — рычаги; 3 — болт; 4 — хомут; 5, 36 — рычаги управления; 7, 10, 12, 26, 28, 31, 33, 37 — тяги; 8, 30 — шитки; 9, 29 — поводковые коробки; 11 — стяжная муфта; 13, 25 — штифты; 15 — серья; 16, 20 — тяги ленточного тормоза; 17, 22 — пружины; 18, 21 — тяга бортового фрикциона; 27, 32 — валики

поворотом машины. Гидропривод также снабжен золотником управления, занимающим принудительно и независимо от гидросилителя крайние положения таким образом, что в зависимости от его положения заслонка может находиться соответственно в закрытом или открытом положении. Причем при закрытом положении любое перемещение рычага управления поворотом машины не влияет на положение заслонки, а при открытом положении перемещение рычага управления поворотом машины вызывает пропорциональный поворот заслонки.

На рис. 4 показаны приводы управления левой и правой заслонками водометных движителей в положениях, соответствующих движению машины на суше (а) и на плаву (б).

Гидропривод управления заслонкой водометного движителя состоит: из корпуса 1 гидросилителя; поршня 2, соединенного шарнирно с одной стороны с элементом 3 привода заслонки, а с другой стороны — с задающим золотником 4 через коромысло 5 и серьгу 6. Коромысло 5 также шарнирно связано с элементами 7 привода управления поворотом машины на суше. Оси поршня 2 и задающего золотника 4 расположены параллельно. В корпус 1 гидросилителя встроен золотник 8 управления гидросилителем, который принудительно может занимать крайние положения, например: одно положение при включении в коробке перемены передач привода к водометным движителям, другое — при его выключении. В данной конструкции золотник 8 управления включает гидравлически. Для его принудительного перемещения служит двухпозиционный золотниковый распределитель 9. Весь гидропривод управления заслонками располагается в кормовом моторно-трансмиссионном отделении машины рядом с элементами привода управления поворотом машины на суше [3].

Предлагаемый привод управления заслонками работает следующим образом. Когда привод управления заслонкой водометного движителя находится в положении, соответствующем движению машины на суше (см. рис. 4, а), т. е. двухпозиционный золотниковый переключатель 9 подает рабочую жидкость в левую полость золотника 8 управления гидросилителем, а правую соединяет со сливом, тогда золотник 8 находится в крайнем правом положении, а рабочая жидкость из напорной магистрали через полости в корпусе 1 и проточки в золотнике 8 поступает в правую полость цилиндра,



**Рис. 3. Тросовый привод управления заслонкой для плавающей машины:**

1 — кронштейн; 2 — подвижная втулка; 3 — рычаг управления; 4 — втулка; 5 — стяжная муфта; 6 — резьбовая тяга; 7 — трос; 8, 10, 12, 13 — ролики; 9, 11, 14 — кронштейны; 15 — валик

а левая — соединяется со сливом, и поршень 2 находится в крайнем левом положении, что соответствует положению полностью закрытой заслонки. В этом случае перемещение элементов 7 привода управления поворотом машины (перемещение их может совершаться только вправо) вызовет качание коромысла 5 вокруг шарнира поршня 2 и перемещение задающего золотника 4 с помощью серьги 6. Золотник 8 и поршень 2 будут оставаться при этом неподвижными.

Когда двухпозиционный золотниковый переключатель 9 подает рабочую жидкость в правую полость золотника 8, а левую соединит со сливом, золотник 8 переместится в левое крайнее положение и соединит правую полость цилиндра со сливом, а левую — с напорной магистралью. Поршень 2 под давлением рабочей жидкости будет двигаться вправо и через коромысло 5 и серьгу 6 перемещать задающий золотник 4 до тех пор, пока его пояски не перекроют каналы напора и слива. При этом поршень 2 остановится, а заслонка будет полностью открыта. В этом положении (см. рис. 4, б) при перемещении элемента 7 привода управления поворотом машины вправо будет перемещаться задающий золотник 4, соединяя правую полость цилиндра с напорной магистралью, а левую — со сливом, вследствие чего поршень 2, перемещаясь влево, с помощью элемента 3 поворота заслонки закрывает ее, а посредством коромысла 5 и серьги 6 перемещает задающий золотник 4 до тех пор, пока его пояски не перекроют каналы напора и слива и поршень 2 не остановится.

Таким образом, перемещение элементов 7 управления поворотом машины вправо вызовет про-

порциональное перемещение поршня 2, элементов 3 поворота заслонки и, соответственно, на пропорциональный угол закроется (или откроется при возвращении элементов 7 привода управления поворотом в исходное положение) заслонка. Иными словами, предложенное устройство является гидросилителем с жесткой обратной связью по перемещению задающего золотника 4.

На рис. 5 изображен упрощенный (без задающего золотника) гидравлический привод управления заслонками водометных движителей: в положении

ях, соответствующих движению машины на суше (а) и на плаву (б).

Упрощенный гидравлический привод управления заслонками водометных движителей в движении совмещен с приводом управления поворотом на суше, в механической части является продолжением этого привода и выполнен следящим по перемещению в гидравлической части.

Данный привод для управления заслонкой водометного движителя плавающей ГМ, оборудованной приводом управления механизмом поворота

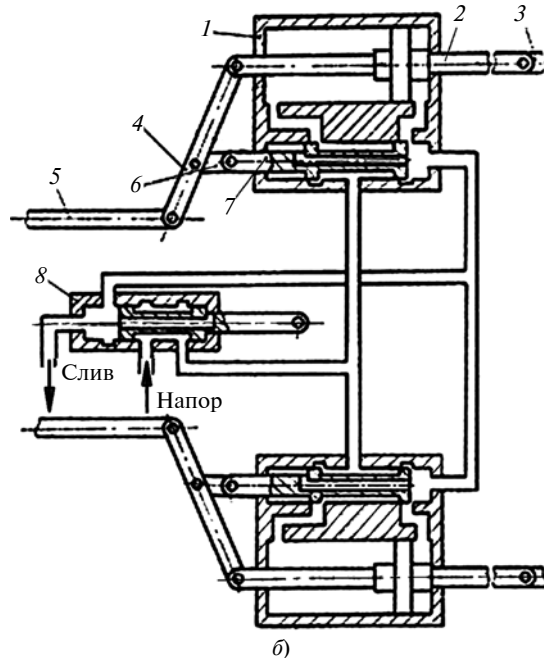
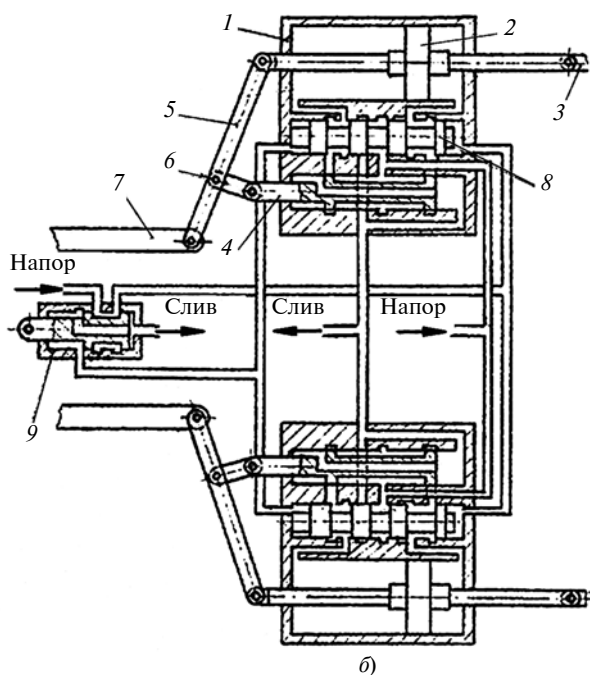
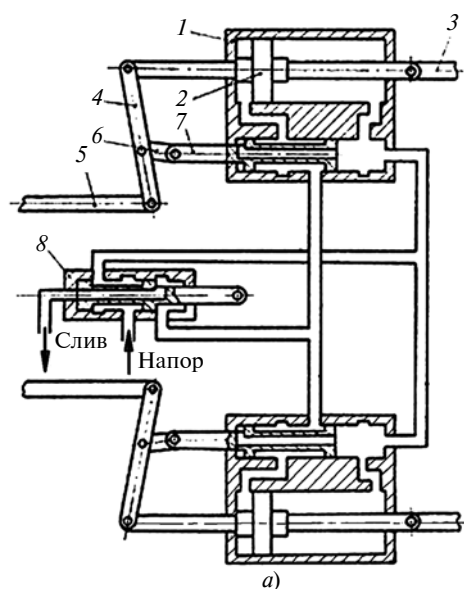
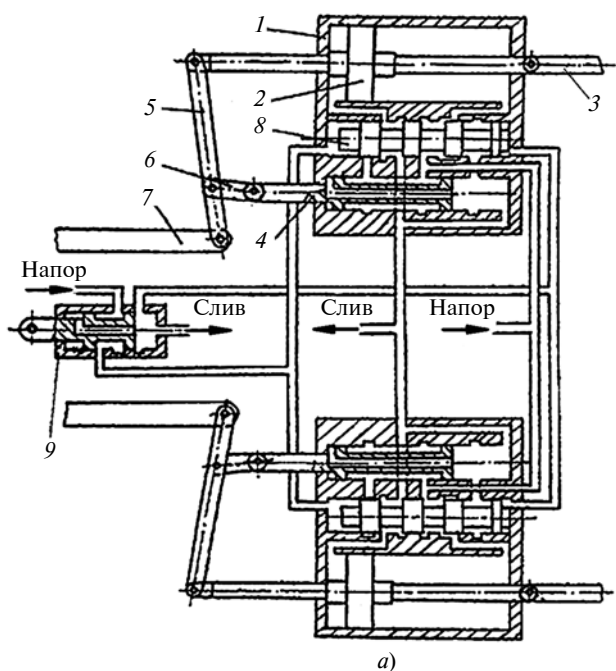
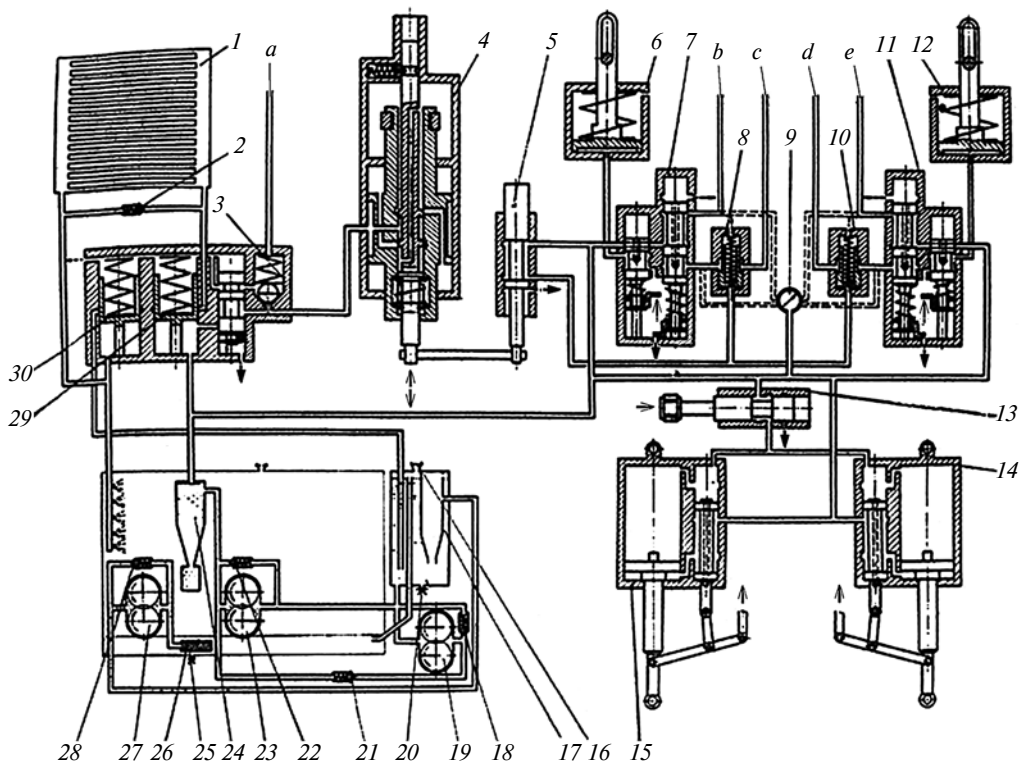


Рис 4. Привод управления левой и правой заслонками водометных движителей в положениях, соответствующих движению машины на суше (а) и на плаву (б)

Рис. 5. Упрощенный гидравлический привод управления заслонками водометных движителей при движении машины на суше (а) и на плаву (б):

1 — корпус гидросилителя; 2 — поршень; 3 — привод к заслонке; 4 — коромысло; 5 — элемент привода управления машины на суше; 6 — серьга; 7 — задающе-управляющий золотник; 8 — двухпозиционный золотниковый распределитель





**Рис. 6.** Схема системы гидроуправления и смазки трансмиссии легкой плавающей гусеничной машины с упрощенным гидравлическим приводом управления заслонкой водометного движителя с задающе-управляющим золотником:

1 — радиатор; 2 — перепускной клапан; 3 — клапанная коробка; 4 — гидросервомеханизм включения передач; 5 — коробка блокировки поворота; 6, 12 — тормозные цилиндры; 7, 11 — золотниковые коробки; 8, 10 — золотники блокировки поворота; 9 — приемник манометра; 13 — гидропереключатель управления заслонками; 14, 15 — гидропривод управления заслонками; 16 — заливная горловина; 17 — масляный бак; 18, 22, 28 — перепускные клапаны; 19 — масляный насос с электроприводом; 20, 25 — сливные клапаны; 21 — обратный клапан; 23 — нагнетающий масляный насос; 24 — гидроциклон; 26 — заборный фильтр; 27 — откачивающий масляный насос; 29 — клапан главного давления; 30 — клапан смазки; a—e — трубопроводы: a — в цилиндр главного фрикциона; b и c — правые бустеры прямолинейного движения и поворота; d и e — левые бустеры поворота и прямолинейного движения

на суше, содержащим рычаги и соединительные тяги, выполнен с гидроусилителем и задающе-управляющим золотником, гидравлически связанными между собой. Гидроусилитель снабжен корпусом с поршнем, который связан с заслонкой водометного движителя и с шарнирно соединенным с ним двуплечим рычагом. Последний связан с приводом управления механизмом поворота на суше, а посредством серьги — с задающе-управляющим золотником, расположенным параллельно поршню гидроусилителя.

При выключенных водометах заслонки удерживаются в закрытом состоянии поршнем гидропривода. При включении водометных движителей заслонки автоматически открываются. Это сделано для упрощения конструкции и снижения массы ГМ, а также для облегчения ее управления вследствие уменьшения усилий в приводе.

На рис. 6 изображена схема системы гидроуправления и смазки трансмиссии легкой плавающей ГМ с упрощенным гидравлическим приводом управления заслонкой водометного движителя с задающе-управляющим золотником.

Конструкция гидравлического привода заслонок водометного движителя не требует отдельных

рычагов управления заслонками, что упрощает управление машиной, удобно компоновается, имеет меньшую массу по сравнению с существующими конструкциями приводов плавающих машин, имеет гидравлическое сервирование, что снижает усилие на органах управления заслонкой водометных движителей, а следовательно, обеспечивает меньшую утомляемость механика-водителя.

#### В ы в о д

Конструкция гидравлического привода заслонок водометного движителя, совмещенного с приводом управления машиной на суше, перспективна при создании новых плавающих машин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Балдин В. А. Теория и конструкция танков. М.: Министерство обороны СССР, 1975. 442 с.
2. Руководство по материальной части танков ПТ-76 и ПТ-76 П. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1967. 375 с.
3. Боевая машина пехоты БМП-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ч. 2. М.: Военное издательство, 1988. 352 с.

Н. С. ГАЛДИН, д-р техн. наук, И. А. СЕМЕНОВА, канд. техн. наук (Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск), e-mail: galdin\_ns@sibadi.org

## Гидравлические ножницы на базе экскаватора

Разработана конструкция гидравлических ножниц, устанавливаемых на гидравлический экскаватор вместо ковша и предназначенных для разрезания металлических и разрушения бетонных конструкций. Приведены функциональные зависимости основных параметров гидравлических ножниц.

**Ключевые слова:** гидравлические ножницы, гидравлический экскаватор, проектирование.

The design of hydraulic shears installed on a hydraulic excavator instead of a bucket and designed to cut metal and destroy concrete structures is developed. The functional dependencies of the main parameters of hydraulic shears are given.

**Keywords:** hydraulic shears, hydraulic excavator, design.

Гидравлические механизмы широко используются в различных отраслях промышленности. Применяются они и в качестве сменного рабочего оборудования дорожно-строительных, горных и других машин [1–6].

Активизация рабочего оборудования дорожно-строительных машин обеспечивает создание необходимых усилий, достаточных для разработки прочных грунтов, материалов, разрушения негабаритных конструкций, бетонных покрытий.

Одноковшовые гидравлические экскаваторы в настоящее время являются ведущими многофункциональными строительными машинами и находят широкое применение благодаря использованию различных сменных рабочих органов и рабочего оборудования.

Использование широкой номенклатуры сменного рабочего оборудования и рабочих органов экскаваторов повышает производительность машин, уровень механизации работ, позволяет снижать их стоимость и сокращать сроки выполнения работ в строительстве.

При демонтаже, сносе и реконструкции зданий эффективным сменным инструментом, по сравнению с гидромолотом, по шумо-вибрационным характеристикам, а также по разрушению бетонных армированных конструкций являются гидравлические ножницы (гидроножницы).

Гидроножницы относятся к навесному рабочему оборудованию, которое можно устанавливать на

гидравлические экскаваторы любых моделей вместо ковша. Гидроножницы выпускаются различными фирмами Германии, Кореи, Франции, России и других стран.

На рис. 1 представлены гидроножницы разных конструкций, а на рис. 2 показан экскаватор с гидроножницами.

Гидроножницы позволяют разрушать бетонные конструкции при сносе ветхих строений без сильного шума, аккуратно и четко разрезать армированный бетон. Также гидроножницы эффективны при строительстве обширных жилых комплексов и фундаментов, разборе завалов разрушенных зданий после землетрясений или в других чрезвычайных

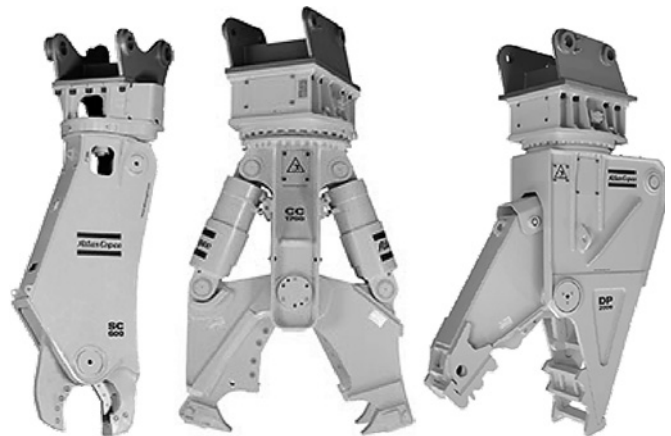


Рис. 1. Гидроножницы разных конструкций



Рис. 2. Экскаватор с гидроножницами

ситуациях. Гидроножницы обладают достаточно высокой маневренностью и способны успешно работать в ограниченных условиях города, не создавая шума.

Гидроножницы, как правило, состоят из следующих основных элементов: верхней челюсти, нижней челюсти, гидроцилиндров и ножей. Верхняя челюсть обычно бывает подвижной и с помощью шарниров крепится к гидроцилиндрам.

Гидроцилиндры предназначены для управления верхней челюстью. Верхняя и нижняя челюсти служат для зажима какой-либо арматуры. Ножи используют для разрезания металлических конструкций или бетона. Усилие на штоке гидроцилиндра гидроножниц зависит от силы резания, длины плеча от оси вращения верхней челюсти до гидроцилиндра, прочностных свойств материала.

Большинство моделей оснащены специальным гидравлическим механизмом, который обеспечивает свободное вращение гидроножниц на  $360^\circ$ . Благодаря механизму вращения обеспечивается автоматический поворот в оптимальную позицию железобетонной плиты или какого-то другого объекта, захваченного гидроножницами.

Современные модели гидроножниц по своему назначению делятся на несколько основных типов [7–10]:

- для резки металла;
- для разрушения бетона;
- для измельчения плит (железобетонных и др.);
- для работы с древесными материалами;
- универсальные;
- для подводных работ.

Гидроножницы для резки металла применяются для резки металлоконструкций. Гидравлические измельчители предназначены для дробления и измельчения фрагментов железобетонных плит. Гидроножницы для лесоматериалов предназначены для работы с древесными материалами, в том числе пнями, бревнами, железнодорожными шпалами и древесным мусором.

Универсальные гидроножницы в основном применяются на начальной стадии разрушения зданий с конструкциями из самых разных материалов — от железобетона до стальных профилей.

Гидроножницы для подводных работ создавались для работы в тяжелых условиях морской нефтедобывающей промышленности: специально для подводных работ, связанных с установкой, перемещением и разрезанием морских буровых платформ и трубопроводов.

Возможности экскаватора для установки на него навесных гидроножниц определяются массой экскаватора, мощностями насосной установки и привода двигателя, номинальным давлением и по-

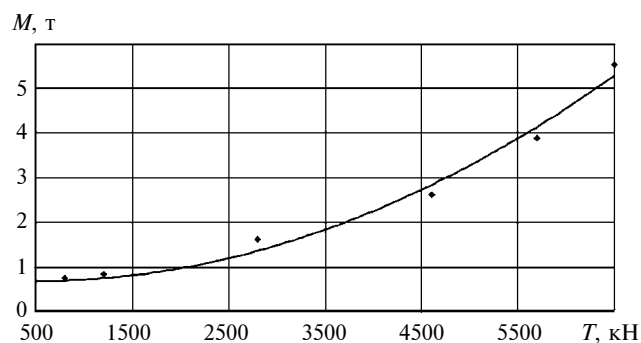


Рис. 3. Зависимость массы  $M$  гидроножниц от усилия  $T$  резания

дачей насоса. Гидроножницы присоединяются к стреле (рукоятки) и гидросистеме экскаватора.

К основным конструктивным параметрам гидроножниц относятся:

масса; максимальная ширина раскрытия челюстей; сила разрушения на режущей части; сила разрушения в начале челюстей; сила разрушения на конце челюстей; сила резания; режущая способность (резка арматуры двутавровой балки); общая длина; общая ширина; длина режущей части; номинальное давление; механизированное вращение на  $360^\circ$ ; масса базового экскаватора.

Проектирование гидроножниц начинается с тщательного анализа возможных конструкторских решений и разработки технического задания (ТЗ) и представляет собой процесс, который включает синтез структуры объекта, выбор конструктивной схемы гидроножниц, расчет параметров их элементов.

Далее создается математическая модель гидроножниц, исследование которой позволяет изучить их свойства и выяснить, в какой мере разработанный объект соответствует своему назначению.

На основе регрессионного анализа статистических данных технических характеристик гидроножниц различных фирм была установлена функциональная зависимость между массой гидроножниц и усилием резания:

$$M = 0,0001T^2 - 0,1257T + 717,67, \quad (1)$$

где  $M$  — масса гидроножниц, кг;  $T$  — усилие резания, кН,  $T \in (500, 6500)$ .

Усилия резания, развиваемые гидроножницами для разделки металлолома и разрушения железобетонных покрытий, достигают значений от 500 до 6500 кН при массе от 750 до 5500 кг (рис. 3).

Усилие резания зависит от таких факторов, как физико-механические свойства разрушаемого материала, площадь сечения среза, геометрические размеры режущих ножей и др.

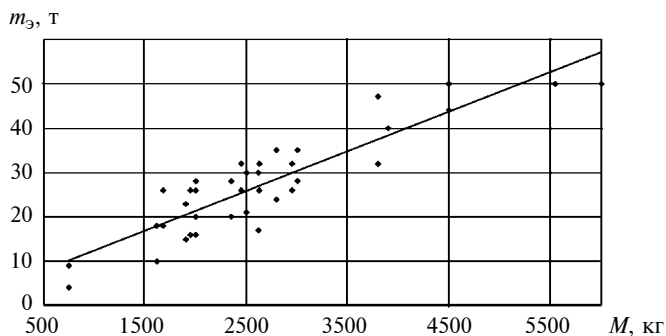


Рис. 4. Зависимость массы  $m_3$  экскаватора от массы  $M$  гидророжниц

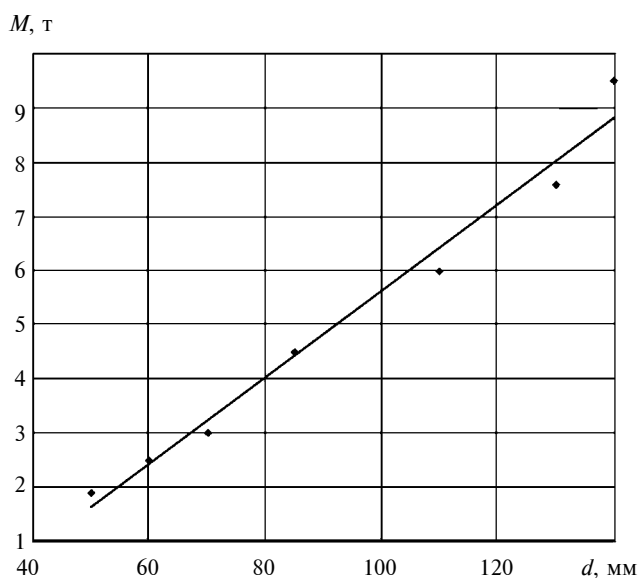


Рис. 5. Зависимость массы  $M$  гидророжниц от диаметра  $d$  разрезаемого металлического прутка

В зависимости от назначения гидророжниц, комплекса внешних воздействий, типоразмера базовой машины у проектанта-разработчика имеется возможность изменять число связей между моделями и исследовать наиболее важные эффекты, проявляющиеся при работе гидророжниц.

В результате регрессионного анализа статистических данных установлена функциональная зависимость между массой экскаватора и массой гидророжниц:

$$m_3 = 0,009M + 3,479, \quad (2)$$

где  $m_3$  — масса экскаватора, т;  $M \in (500, 6000)$  кг — масса гидророжниц.

На рис. 4 представлена зависимость массы экскаватора от массы гидророжниц. Из графика видно, каким образом масса гидророжниц влияет на выбор базовой машины — экскаватора.

Установлена функциональная зависимость между массой  $M$  гидророжниц и диаметром  $d$  разрезаемого металлического прутка:

$$M = 7,874d - 2359,9 \text{ кг}, \quad (3)$$

где  $d \in (50, 140)$  мм.

На рис. 5 представлена зависимость массы гидророжниц от диаметра разрезаемого металлического прутка. Видим, что с увеличением диаметра  $d$  металлического прутка необходимо выбирать гидророжницы с большей массой  $M$ .

Таким образом, проектирование гидророжниц представляет собой итерационный процесс, связанный с последовательным улучшением системы, принятием уточняющих конструктивных решений с учетом полученных уравнений регрессии (1)—(3). Каждый цикл включает в себя анализ эффективности объекта проектирования, влияния на него характеристик элементов гидророжниц и ограничений. При создании гидророжниц необходимо рассматривать большое число вариантов структур, параметров и изменять, уточнять математическую модель.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Галдин Н. С., Семенова И. А. Гидравлические схемы мобильных машин: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 203 с.
2. Галдин Н. С. Элементы объемных гидроприводов мобильных машин: справочные материалы, учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2008. 127 с.
3. Галдин Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин: монография. Омск: СибАДИ, 2005. 223 с.
4. Галдин Н. С., Семенова И. А. Автоматизированное моделирование гидроударного оборудования для экскаваторов: монография Омск: СибАДИ, 2008. 101 с.
5. Галдин Н. С., Архипенко Д. С. Гидравлические ножницы как предмет моделирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж: ВГТУ, 2010. Т. 6. № 9. С. 96—98.
6. Галдин Н. С., Семенова И. А. Гидравлические элементы мобильных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие. Электрон. дан. Омск: СибАДИ, 2016. 231 с.
7. Гидророжницы по металлу [Электронный ресурс]. URL: [http://www.atmachinery.ru/catalog\\_gidronozhnitsy\\_dlya\\_rezki\\_metalla](http://www.atmachinery.ru/catalog_gidronozhnitsy_dlya_rezki_metalla)
8. Гидророжницы для разрушения железобетонных конструкций [Электронный ресурс]. URL: [http://www.atmachinery.ru/catalog\\_gidronozhnitsy\\_dlya\\_rezki\\_zhelezobetona/](http://www.atmachinery.ru/catalog_gidronozhnitsy_dlya_rezki_zhelezobetona/)
9. Спецтехника и строительные работы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ruskovcheg.ru/index.html>, свободный.
10. Гидравлические ножницы Delta MP 2000 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.techno-park.com/ru/catalog/Hinged\\_equipment/Gidrononicy/Delta\\_Gidrononicy/Gidrononicy\\_secondary\\_treatment/Delta\\_MP\\_2000\\_hydraulic\\_shear/Description.htm](http://www.techno-park.com/ru/catalog/Hinged_equipment/Gidrononicy/Delta_Gidrononicy/Gidrononicy_secondary_treatment/Delta_MP_2000_hydraulic_shear/Description.htm), свободный.

Ю. Г. КАБАЛДИН, д-р техн. наук, Д. А. ШАТАГИН (Нижегородский ГТУ им. П. Е. Алексеева), e-mail: ugu.40@mail.ru

## Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве

Исследованы возможности и преимущества перехода промышленных предприятий к цифровому производству с глубокой интеграцией физических и вычислительных процессов в единое информационное пространство. Предложена конструкция интеллектуального устройства на основе нейроморфных вычислений для адаптивного управления процессом резания и оценки текущего состояния станка с ЧПУ.

**Ключевые слова:** цифровое производство, киберфизические системы, гибридные технологии, нейроморфный чип, блокчейн, станки с ЧПУ.

The possibilities and advantages of the transition of industrial enterprises to digital production with the deep integration of physical and computational processes into a single information space are studied. A design of an intelligent device based on neuromorphic calculations for adaptive control of the cutting process and assessment of the current state of the CNC machine is proposed.

**Keywords:** digital production, cyberphysical systems, hybrid technologies, neuromorphic chip, blockchain, CNC machines.

В настоящее время осуществляется переход промышленных предприятий к цифровому производству, реализуемый в рамках концепции Индустрия 4.0. Одной из основных задач при этом является оцифровывание существующих производственных систем и создание принципиально новых технологических систем на базе станков с ЧПУ, способных осуществлять высокопроизводительную механическую обработку благодаря приданию им новых отличительных функций [1, 2], в частности применением гибридных технологий. Главной особенностью таких систем является глубокая интеграция физических и вычислительных процессов в единое информационное пространство, позволяющая в значительной степени повысить качество, производительность и эффективность производственной системы в целом путем постоянного мониторинга технического состояния оборудования и опре-

деления оптимальных режимов его работы, обеспечивающих высокую стабильность процессов резания. Такие технологические системы следует характеризовать как киберфизические системы (КФС).

Для реализации данных возможностей станки с ЧПУ должны быть оснащены специальными датчиками и устройствами, способными собирать, анализировать диагностическую информацию и обмениваться ею друг с другом. Как показывают исследования, каждую секунду технологическое оборудование генерирует миллионы байт полезной информации, характеризующей его текущее и будущее состояние. Однако современные системы мониторинга и стойки ЧПУ собирают и анализируют менее 1 % полезных данных и этой информации недостаточно для объективного анализа различных процессов, протекающих в станке. Наиболее информативным источником

диагностических данных является виброакустическая эмиссия (ВАЭ), которая всегда сопровождает процессы в станках. Однако существует ряд проблем при работе с данным типом сигналов, характеризующихся сложным составом и высокой степенью зашумленности.

Современными подходами [1–5] в области обработки больших объемов разнородных диагностических данных и области автоматического управления техническими объектами являются подходы с использованием искусственного интеллекта (ИИ), в частности искусственных нейронных сетей (ИНС) глубокого обучения, реализованных как на программном, так и на аппаратном уровне (нейроморфные чипы). Возможности ИНС позволяют выявлять скрытые зависимости в крупных массивах данных, распознавать и классифицировать цифровые сигналы в режиме реального времени, накапливать и систематизировать новые знания об исследуемом объекте, прогнозировать динамику изменения состояния объекта, а также определять оптимальные режимы.

Подходы с использованием ИИ требуют постоянного сбора и накопления знаний о протекающих процессах, а также периодического обмена знаниями между интеллектуальными единицами производственной системы, позволяющего значительно ускорить процесс обучения группы киберфизических систем.

Обязательным условием интеграции КФС в производство является создание сети промышленного интернета и распределенных баз данных (БД) для обмена информацией и знаниями между производственными единицами по зашифрованным каналам. Современным подходом в области криптографии и обмена данными является технология "Блокчейн" [1].

## Программная реализация

Для анализа текущего технического состояния оборудования и оптимизации режимов обработки необходима математическая модель станка. Однако вследствие многофакторности самого процесса резания и неоднородности параметров упругой системы станка в зависимости от взаимного расположения узлов и формы обрабатываемой заготовки получение аналитических моделей значительно затруднено, а в производственных условиях и вовсе невозможно, так как надо дополнительно учитывать различные уникальные факторы и текущий износ оборудования. Для решения данной проблемы предлагается использовать **нейросетевые модели** оборудования. Создание таких моделей осуществляется в процессе обучения ИНС на реальных данных, полученных во время работы оборудования. При этом учитывается множество различных факторов: форма и материал заготовки, геометрия инструмента, положение формообразующих поверхностей инструмента и т. д. Обучающая выборка для ИНС может быть представлена в виде двух  $n$ -мерных векторов. Первый вектор — входной, характеризует условия обработки, а выходной вектор характеризует соответствующие состояния технологической системы. При этом регистрируется состояние в различные моменты времени и на всем протяжении обработки.

Нейросетевая модель [1–6] позволит учитывать уникальный динамический портрет, характеризующий возможности станка, качество обработки, экономичность, производительность, текущее и будущее техническое состояние оборудования. Для регистрации сигналов необходимо размещение датчиков в различных точках станка (рис. 1). Места размещения выбирают на основе анализа компоновки и конструкции оборудования. Как правило,



Рис. 1. Размещение сенсоров на станке с ЧПУ:

1 — датчик акустической эмиссии и температуры привода главного движения; 2 — встроенные сенсоры станка; 3 — датчик виброакустической эмиссии в зоне резания; 4 — датчик виброакустической эмиссии и температуры привода подачи станка

это приводы главного движения и движения подачи, а также сама зона резания. Информация о положении рабочих органов, скорости резания и подаче может регистрироваться непосредственно со стойки ЧПУ (см. рис. 1).

Процесс получения данных для обучения нейросетевых моделей должен сопровождаться автоматическим анализом избыточности и недостаточности данных. Для этого в системе предусмотрен специальный интеллектуальный диалоговый модуль, который на основе кластерного анализа собранных данных выявляет "пустые" зоны векторного пространства в обучающей выборке. Также данный модуль может выдавать рекомендации для проведения серий дополнительных уточняющих испытаний для заполнения таких зон или осуществлять поиск в сторонних БД. Дополнительной важной особенностью системы является оценка адекватности проведенного моделирования. После обучения нейросетевая модель (рис. 2) способна прогнозировать различные состояния станка во времени.

В результате на этапе технологической подготовки производства технолог получает доступ к нейросетевой модели станка и осуществляет загрузку управляющей программы (УП) из САМ

системы для последующего анализа и оптимизации. В автоматическом режиме происходит анализ формы заготовки в рабочем пространстве станка на основе разработанных нейросетевых алгоритмов классификации "облака" точек 3D-модели заготовки (рис. 3). Затем полученные данные о форме заготовки и информация о технологических условиях поступают на вход нейросетевой модели станка для осуществления **имитационного моделирования** (рис. 4). В зависимости от установленного шага система моделирует динамическое состояние в различных точках траектории перемещения инструмента, при этом определяются: параметр  $Ra$  шероховатости поверхности, остаточный ресурс  $t$  инструмента, амплитуда  $A$  колебаний и степень устойчивости  $Df$ . Адекватность моделирования составила 92 % (точка 1) и 87 % (точка 2). В соответствии с назначенными ограничениями и целевыми функциями происходит **оптимизация режимов и условий обработки** в каждой моделируемой точке. Оптимальные подача  $S_m$  и скорость резания  $x$  составили соответственно: в точке 1 — 500 мм/мин и 120 м/мин; в точке 2 — 450 мм/мин и 100 м/мин. В точке 1 оказалось невозможным достичь заданного параметра  $Ra$ .

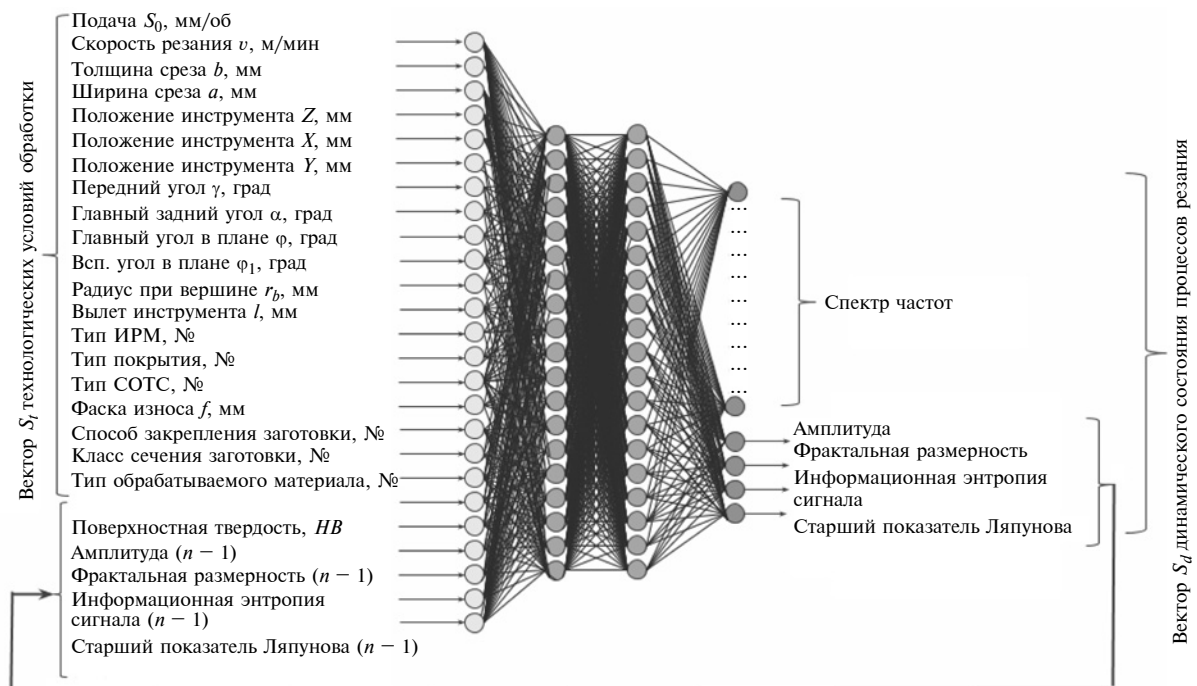


Рис. 2. Пример нейросетевой модели динамической устойчивости процесса резания

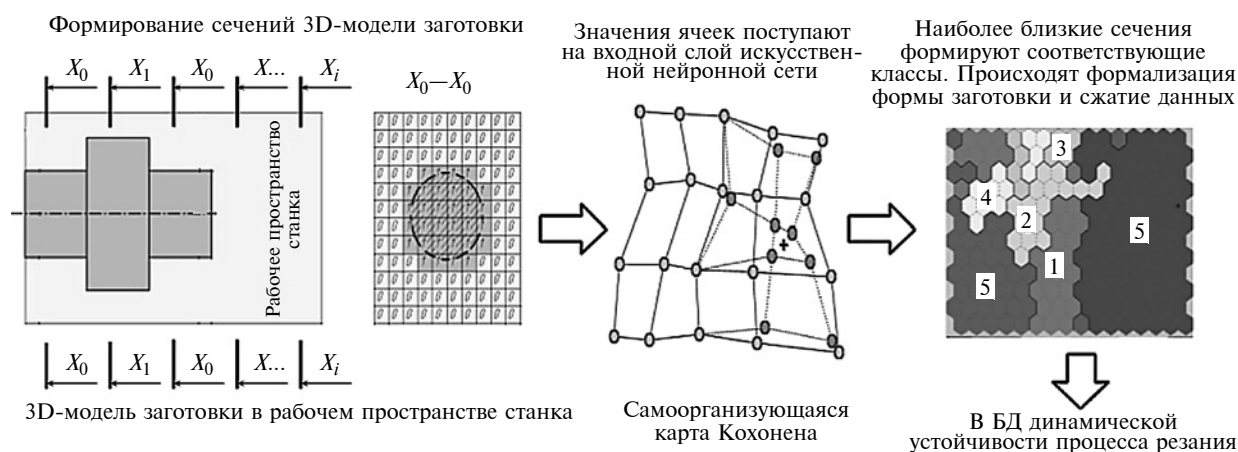


Рис. 3. Интеллектуальный анализ формы заготовки:

0—5 — сформированные классы сечений

По окончании моделирования выдается скорректированная УП для отправки на станок.

### Хранение и обработка данных

С учетом постоянного потока большого массива данных в системе используются распределенное и облачное хранения БД, при этом осуществляется криптографическая защита всех данных. Собранная в БД (рис. 5) информация подвергается комплексному анализу с использованием подходов Big Data и Data Mining. Применяемые регрессионный и

кластерный анализы данных с использованием ИНС позволяют выявлять скрытые зависимости и новые классы в массивах информации. Для ускорения процессов обработки используются возможности параллельных вычислений Nvidia CUDA [1—8]. Впоследствии с использованием диалогового модуля уточняются новые выявленные классы данных и зависимостей совместно с экспертом. Таким образом, структура БД подразумевает создание цифровых двойников оборудования и предприятия в целом. Такой под-

ход позволяет проводить масштабное моделирование и оптимизацию различных процессов с учетом особенностей производства и оборудования.

### Мультиагентное обучение

Учитывая высокую потребность в информации о состоянии технологических процессов и оборудования, для оптимального функционирования данной системы используют методы обмена знаниями между единицами оборудования. Возможность обмена знаниями основывается на оцен-

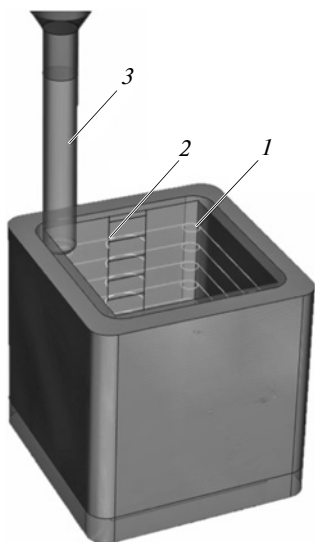


Рис. 4. Имитационное моделирование процесса фрезерования и оптимизация режимов обработки в точках 1 и 2 траектории перемещения концевой фрезы 3

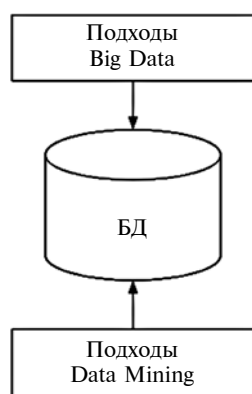


Рис. 5. БД динамической устойчивости

ке степени подобия технологических единиц, для чего сравнивают отклики разных станков на одинаковое динамическое воздействие в ходе имитационного моделирования. Если разница между откликами находится в заданных пределах, то системы признают подобными, т. е. способными обмениваться знаниями (рис. 6).

Объединение станков сетью промышленного интернета [1, 7, 9] позволит осуществлять таргетированный поиск необходимых знаний для конкретных условий обработки. Весь обмен данными осуществляется на основе технологии "Блокчейн" и позволяет отследить историю всех транзакций и предотвратить несанкциониро-

ванный доступ к данным. Такой подход позволяет организовать принципиально новые производственные единицы для добычи и хранения новых знаний и информации о технологических процессах. Полученные знания в ходе работы КФС имеют собственную стоимость и могут использоваться в качестве пассивного источника доходов.

### Аппаратная реализация. Нейроморфные чипы

Для аппаратной реализации обозначенных методов и подходов используются стандартные протоколы обмена данными, проводные и беспроводные сети, промышленные серверы хранения данных, а также специальные интеллектуальные устройства сбора и обработки данных — **нейроморфные контроллеры (НМК)**, разрабатываемые в НГТУ им. Р. Е. Алексеева.

В состав НМК входят аналого-цифровые преобразователи (АЦП), нейроморфный чип (аппаратная реализация нейросетевых алгоритмов), устройство шифрования и передачи данных, устройство адаптивного управления процессом механической обработки (ПЛИС) и центральный процессор (ЦП) для согласования и управления всеми элементами (рис. 7). На вход АЦП поступают данные от системы распределенных сенсоров [в виде виброакустических сигналов (АС)

и данных со стойки ЧПУ], где они оцифровываются, а затем поступают на вход нейрочипа. Происходят их классификация и определение состояния технологической системы. На основе полученных данных осуществляется корректировка режимов обработки в реальном времени с использованием адаптивного устройства ПЛИС. Все полученные данные отправляются в БД в зашифрованном виде. Передача исходной и обработанной информации о состоянии станка в распределенные базы данных происходит с использованием технологии "Блокчейн" и "Промышленного интернета вещей". Использование промышленных нейрочипов позволяет обеспечить стабильность работы системы, высокую производительность и низкое энергопотребление.

В состав НМК входят два принципиальных модуля. Первый модуль позволяет анализировать динамическую устойчивость самого процесса резания как автоколебательной системы, применяя при этом подходы нелинейной динамики и искусственного интеллекта. Второй модуль дает возможность анализировать техническое состояние таких узлов, как коробки передач, подшипники, электродвигатели, направляющие и т. д. Здесь применяются в основном детерминированные универсальные зависимости и алгоритмы. Подходы ИИ используются в качестве дополнения и

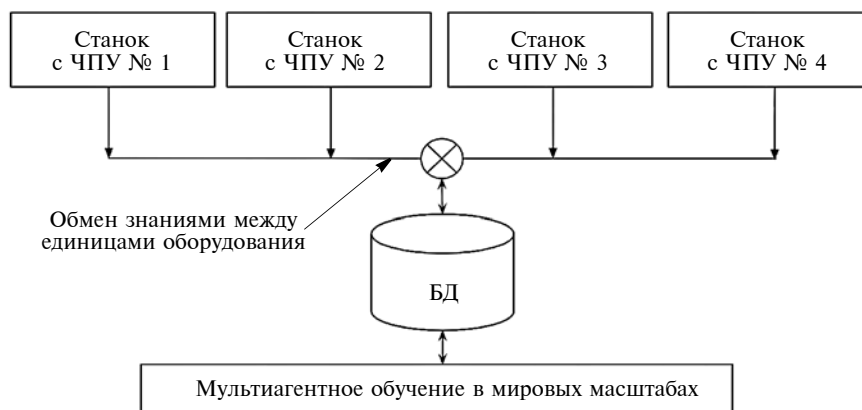


Рис. 6. Обмен знаниями между станками



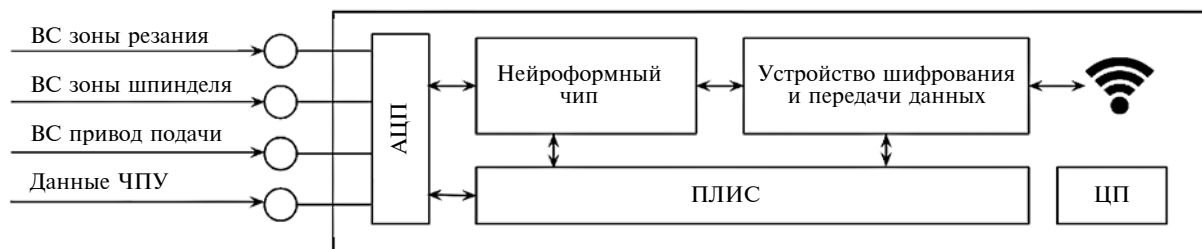


Рис. 7. Программируемый нейроморфный контроллер промышленного назначения конструкции НГТУ им. Р. Е. Алексеева для интеллектуального управления станком с ЧПУ

учитывают особенности конкретного оборудования.

### **Преимущества оцифровывания машиностроительных производств:**

сокращение времени подготовки производства до 30 % в результате оптимизации режимов обработки и корректировки управляющих программ на основе нейросетевого моделирования процессов механической обработки с учетом текущего состояния станка;

повышение стойкости инструмента до 4 раз в результате оптимизации режимов и условий обработки;

управление качеством изделия на этапе технологической подготовки производства;

значительное сокращение времени простоя оборудования вследствие постоянного мониторинга и прогнозирования его технического состояния;

постоянный сбор и накопление знаний;

обмен знаниями между единицами оборудования, позволяющий ускорить процесс обучения нейросетевых моделей;

определение причин простоя; инвариантность к производителю оборудования.

### **Основные этапы оцифровывания машиностроительного производства**

1. Анализ конструкции и компоновки станка с целью определения основных мест размещения датчиков.

2. Непосредственное размещение датчиков на станке, кото-

рое не изменяет конструкцию узлов станка и в большинстве случаев может осуществляться без остановки оборудования.

3. Подключение датчиков к промышленному НМК.

4. Развертывание сети промышленного интернета и организация базы данных для хранения информации о станке.

5. Подключение контроллера к сети промышленного интернета.

6. Передача первой информации в БД по зашифрованным каналам.

7. Сбор данных.

8. Обучение нейросетевой модели станка.

9. Апробация нейросетевой модели станка на основе имитационного моделирования процесса резания.

10. Анализ полученных результатов моделирования и реального процесса резания для корректировки моделей.

11. Получение рекомендаций к внедрению.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ**

1. **Искусственный интеллект и киберфизические механообработывающие системы в цифровом производстве:** Монография // Под ред. Ю. Г. Кабалдина. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2018. 271 с.

2. **Кабалдин Ю. Г., Биленко С. В., Серый С. В.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта. Комсомольск н/А: Комсомольский гос. техн. ун-т, 2003. 201 с.

3. **Диагностика** выходных параметров процесса резания в режиме

реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA / Ю. Г. Кабалдин, И. Л. Лаптев, Д. А. Шатагин, С. В. Серый // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80—82.

4. **Интеллектуальные** системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента / Ю. Г. Кабалдин, И. Л. Лаптев, Д. А. Шатагин, и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 47—50.

5. **Оценка** состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием Nvidia CUDA в программной среде LABVIEW / Ю. Г. Кабалдин, И. Л. Лаптев, Д. А. Шатагин и др. // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 114—121.

6. **Разработка** динамического паспорта станка на основе нейросетевого моделирования его рабочего пространства с использованием технологии Nvidia CUDA и подходов глубокого обучения / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, И. Л. Лаптев, Д. А. Сидоренков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 10 (679). С. 49—56.

7. **Промышленный интернет** на практике: удаленная диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum /<http://www.contrologrussia.com/>

8. **Модульное** проектирование станочного оборудования как киберфизических систем на основе искусственного интеллекта и облачных технологий для цифровых производств / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, П. В. Колчин, Р. Ш. Мансуров // Вестник машиностроения. 2019. № 1. С. 7—15.

9. **Организация** и управление механообработывающим цифровым производством / Ю. Г. Кабалдин, П. В. Колчин, Д. А. Шатагин, Р. Ш. Мансуров // Вестник машиностроения. 2018. № 11. С. 19—27.

## Новые конструкции контактных головок токоъемников троллейбусов с графитопластовыми вставками<sup>1</sup>

Проанализированы известные конструкции контактных головок токоъемников троллейбусов с графитопластовыми вставками. Представлены конструкции новых контактных головок, разработанных в ЮУрГУ.

**Ключевые слова:** троллейбус, токоъемник, контактная головка, углеродная композиция, вставка, электрическое сопротивление, плотность.

The known designs of the contact heads of the current collectors of trolleybuses with graphite-plastic inserts are analyzed. Designs of new contact heads developed at South Ural State University are presented.

**Keywords:** trolleybus, current collector, contact head, carbon composition, insert, electrical resistance, density.

В России первая троллейбусная линия была построена в Москве в 1933 г.

В настоящее время в России действуют 86 троллейбусных систем — больше, чем в любой другой стране мира<sup>2</sup>.

Головки токоъемников на первых отечественных троллейбусах, изготовленных на Московском заводе "Динамо", были выполнены в виде ролика, отлитого из оловянистой бронзы. В процессе эксплуатации ролик быстро изнашивался, его ось требовалось смазывать. Кроме того, ролик был неустойчив на контактном проводе, его частые сходы с провода приводили к сбоям уличного движения. Многочисленные попытки совершенствования конструкций роликовых головок к успехам не привели. Для устранения недостатков роликовых головок в 1940 г. Московское троллейбусное хозяйство стало переходить на головки токоъемников с контактными вставками скольжения.

Контактные вставки из композиций на основе углерода начали производить в начале 60-х годов прошлого века на Московском троллейбусном ремонтном заводе по так называемой стандартной технологии МТРЗ. Порошковая композиция вставки содержала 84,74 % (по весу) наполнителя в виде углеродного порошка, 13,62 % связки в виде фе-

нолформальдегидной смолы новолачного типа и 1,64 % отвердителя в виде уротропина [1]. Конструкция углеродной контактной вставки, выпускаемой МТРЗ, описана в А. с. СССР 465352. Учеными ЮУрГУ запатентован ряд новых конструкций вставок (пат. РФ 39541, 120052, 132044, 133058 и др.).

Первая контактная головка с углеродной вставкой была создана специалистами завода "Динамо" в 1938 г. Эта контактная головка на московских троллейбусах находилась в эксплуатации более 10 лет и в 1950 г. была заменена на модернизированную головку, разработанную инженером А. М. Земсковым [2]. Благодаря устойчивости головки токоъемника Земского на контактном проводе, повышенной износостойкости углеродной контактной вставки, ее удобной и быстрой замене, надежному электрическому контакту вставки с элементами головки такие головки и в настоящее время находят практическое применение в троллейбусных парках страны. Следует отметить, что усовершенствование конструкций головок проводится в каждом троллейбусном парке самостоятельно и не прекращается и в настоящее время. Последние модернизированные варианты головок описаны в патентах на изобретения в том числе ученых ЮУрГУ [3–5].

Конструкции контактных головок с энергоэкономными вставками [3, 4] описаны в публикации авторов [6].

### Новая конструкция контактной головки, обеспечивающая минимальный износ контактного провода [7]

Поставленная задача по снижению износа контактного провода решается тем, что контактная головка токоъемника троллейбуса, содержащая пята, две щеки с двумя наклонными гранями, между которыми установлена контактная вставка, контактирующая с вкладышем головки, снабжена накладками из бронзографита толщиной  $h = (0,08 \div 0,10)H$  и шириной  $t = (0,20 \div 0,25)H$ , где  $H$  — ширина контактной вставки, установленной в углублениях наклонных граней щек глубиной  $h_1 = (0,04 \div 0,05)H$  в месте контакта со вставкой и глубиной  $h_2 = (0,05 \div 0,07)H$  с противоположной стороны.

То, что контактная головка снабжена накладками из бронзографита указанных размеров, установленных в углублениях щек, позволяет снизить коэффициент трения между указанными накладками

<sup>1</sup> Статья выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта "Разработка новых способов и технологий создания изделий электротехнического и конструкционного назначения из углеграфитовых композиционных материалов посредством высокоскоростного динамического формования" по Государственному заданию № 9.1329.2017/4.6.

<sup>2</sup> Троллейбусные города России. <http://trollcity.narod.ru>

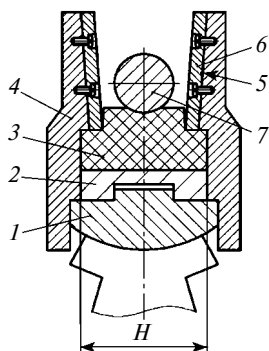


Рис. 1. Конструкция головки по патенту РФ № 164474

и контактным проводом, который равен  $\approx 0,05$ . Это уменьшает износ контактного провода. Выполнение углублений различной глубины вдоль наклонных граней щек позволяет компенсировать неодинаковость износа накладок в процессе эксплуатации (увеличивается по направлению к контактной вставке). Углубления в щеках для размещения в них указанных накладок обеспечивают удержание накладок в процессе эксплуатации и расположение их над поверхностью щек на расстоянии в нижней части  $\approx 3$  мм, а в верхней части  $\approx 1$  мм. Конструкция головки показана на рис. 1.

Контактная головка содержит пята 1, вкладыш 2, контактную вставку 3, накладки 6, установленные в углублениях 5, выполненных на наклонных гранях щек 4. Глубина углублений в месте контакта их с контактными вставками 3 равна  $(0,04 \div 0,05)H$ , а глубина с противоположной стороны равна  $(0,05 \div 0,07)H$ , где  $H$  — ширина контактной вставки. В углубления установлены накладки 6 из бронзографита толщиной  $h = (0,08 \div 0,10)H$  и шириной  $t = (0,20 \div 0,25)H$ .

Контактная головка токосъемника троллейбуса работает следующим образом.

Электрический ток от контактного провода 7 через контактную вставку 3 передается с помощью вкладыша 2 и пята 1 на механизмы движения троллейбуса. При движении троллейбуса контактный провод 7 под действием колебаний может перемещаться в ту или иную сторону. При этом он соприкасается с расположенными в углублениях 5 щек 4 накладками 6 из бронзографита, которые, имея низкий коэффициент трения ( $\approx 0,05$ ) с проводом 7, обеспечивают повышенную износостойкость и длительный срок службы контактного провода.

**Новая конструкция контактной головки, обеспечивающая снижение трудоемкости обслуживания за счет повышения работоспособности вставок [5]**

Поставленная задача по снижению трудоемкости обслуживания путем повышения срока службы

контактных вставок решается тем, что в контактной головке токосъемника троллейбуса, содержащей пята, две щеки с двумя наклонными гранями, между которыми установлена контактная вставка, контактирующая с вкладышем и имеющая рабочую поверхность в виде желоба, имеет по центру головки прямолинейный участок шириной  $(0,4 \div 0,6)H$ , где  $H$  — максимальная ширина вставки, сопряженной с боковыми участками желоба, выполненными по радиусу  $R = (0,29 \div 0,31)H$ . Поверхности контакта щек и вставки и поверхности контакта вставки и вкладыша выполнены под углом  $\pi/6$  к оси головки.

На рис. 2, а, б конструкция головки токосъемника показана при двух положениях токонесущего провода: при положении провода по центру головки (а) и при смещенном от центра головки положении провода (б).

Контактная головка токосъемника троллейбуса содержит пята 1, две щеки 2 с наклонными гранями, между которыми установлена контактная вставка 3, которая контактирует с вкладышем 4 и имеет прямолинейный участок 5 шириной  $h = (0,4 \div 0,6)H$ , где  $H$  — максимальная ширина вставки. Участок 5 сопряжен с боковыми участками желоба по радиусу  $R = (0,29 \div 0,31)H$ . Поверхности контакта щек 2 и вставки 3 и поверхности контакта вставки 3 и вкладыша 4 выполнены под углом  $\pi/6$  к оси головки.

Контактная головка токосъемника троллейбуса работает следующим образом.

Электрический ток по проводу 6 передается контактной вставке 3, установленной в щеках 2. Затем через вкладыш 4 и пята 1 он передается на исполнительные элементы привода троллейбуса. В процессе эксплуатации наружная контактная поверхность провода 6 изнашивается и отличается от цилиндрической. При движении троллейбуса контактная головка постоянно меняет свое положение

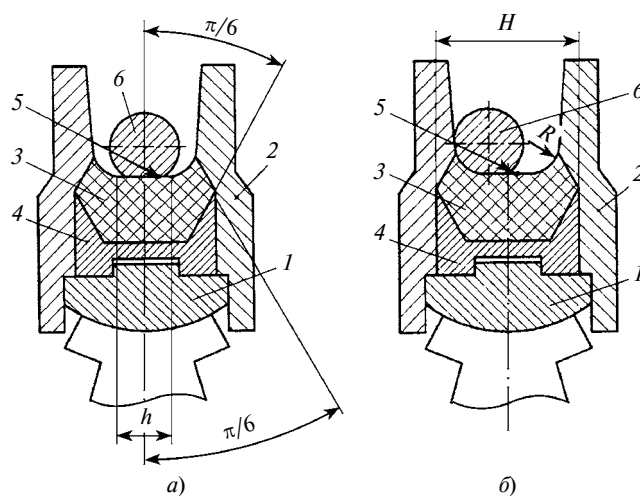


Рис. 2. Конструкция головки токосъемника в положении токонесущего провода по центру головки (а) и в смещенном от центра головки положении (б)

## Центробежно-гирационная мельница для тонкого самоизмельчения продукта

Предложена упрощенная конструкция центробежной мельницы для тонкого измельчения продукта на основе параллелограммного механизма. Достигнута высокая динамическая уравновешенность, обеспечивающая высокую частоту вращения помольных камер, а следовательно, высокую степень измельчения продукта.

**Ключевые слова:** центробежная мельница, параллелограммный механизм, самоизмельчение, тонкий помол.

A simplified design of a centrifugal mill for fine grinding of the product based on a parallelogram mechanism is proposed. A high dynamic balance was achieved, providing a high rotation frequency of the grinding chambers, and hence a high degree of the product grinding.

**Keywords:** centrifugal mill, parallelogram mechanism, self-grinding, fine grinding.

В промышленности часто используется продукт тонкого измельчения, дисперсность частиц которого меньше 10 мкм: краска, шпаклевка, цемент, сухая смазка и т. д. Получение такого продукта — довольно трудный и энергоемкий процесс, требующий применения разных методов и оборудования.

Достаточно широко используется бисерное измельчение в шаровых мельницах, для чего в барабане имеются мелющие тела малого размера — от 1 до 5 мм [1]. Недостатками данного метода являются низкая производительность и высокая энергоемкость (как у всех шаровых мельниц).

Довольно давно применяются мельницы струйного типа [2], в которых сырье разрушается при столкновении встречных потоков на большой скорости. Однако и эти мельницы характеризуются большим расходом энергии и низкой производительностью.

В работе [3] описана ударная шаровая мельница "Трибокинетика", в которой применен центробежный ротор, отбрасывающий к стенкам барабана сырье вместе с мелкими мелющими телами — шарами.

В работах [2, 3] описан процесс непосредственного измельчения, происходящий циклически при встрече двух потоков сырья [2] при ударе сырья с мелющими телами о стенку помольной камеры [3], после чего сырье необходимо вернуть в исходное положение и повторить цикл. Такой процесс характеризуется низкой производительностью, боль-



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 26)

относительно провода, при этом провод занимает во вставке то центральное, то левое или правое положение. При этом прямолинейный участок 5 рабочей поверхности контактной вставки 3 за счет увеличенной зоны контакта его с проводом надежно обеспечивает съем тока на элементы головки.

Наличие прямолинейного участка у контактной вставки позволяет увеличить ее срок службы и обеспечить контакт с частично изношенным проводом, находившимся долгое время в эксплуатации. Это уменьшит число замен в головке изношенных контактных вставок, что снизит трудоемкость ее обслуживания.

Усовершенствованные контактные вставки головок при испытаниях показали более стабильный контакт с проводом городской сети. Это позволило минимизировать потери тока и значительно уменьшить число неполадок, связанных со сходом головки с контактного провода во время движения троллейбуса, вследствие чего затраты труда на ремонт и обслуживание транспортных единиц уменьшаются,

а эффективность работы городского транспорта увеличивается.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ивин К. В., Трофимов А. Н., Энгельс Г. Г.** Токосъем городского наземного транспорта. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 262 с.
2. **Трофимов А. Н.** Контактные вставки токосъемников троллейбусов. М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. 140 с.
3. **Пат. 130262 Рос. Федерации:** МПК В60L 5/04. Контактная головка токосъемника троллейбуса.
4. **Пат. 142050 Рос. Федерации:** МПК В60L 5/04. Контактная головка токосъемника троллейбуса.
5. **Пат. 164475 Рос. Федерации:** МПК В60L 5/10. Контактная головка токосъемника троллейбуса.
6. **Самодурова М. Н., Барков Л. А., Латфулина Ю. С.** Контактные головки токосъемников троллейбусов с углеродными вставками // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 6. С. 18—24.
7. **Пат. 164474 Рос. Федерации:** МПК В60L 5/10. Контактная головка токосъемника троллейбуса.

шими затратами энергии, сложностью технологического цикла и высокой его стоимостью.

Как видно из приведенных примеров, для эффективного измельчения сырья необходимы высокая скорость частиц, их взаимодействие друг с другом и удар о твердые препятствия. Причем взаимодействие частиц должно происходить максимально часто и длительное время.

Автором данной статьи в работах [4–7] предложена оригинальная конструкция центробежно-гирационной мельницы, которая отличается от применяемых шаровых мельниц характером вращения цилиндрической помольной камеры. В данной конструкции помольная цилиндрическая камера совершает плоскопараллельное перемещение по окружности в плоскости, перпендикулярной оси камеры. Такое перемещение создает вращающуюся центробежную силу, направление которой может быть касательным к стенке помольной камеры, что способствует быстрому движению помольных тел и сырья по окружности внутри помольной камеры.

В частности, в работе [6] рассмотрена центробежная мельница, состоящая из привода, помольных барабанов, установленных на водиле, шарнирно соединенном с кривошипным валом (КВ), на котором имеются противовесы. Вал снабжен вторым кривошипом, на конце которого установлен цилиндрический стержень, взаимодействующий посредством паза с рычагом, шарнирно закрепленным на основании. На другом конце рычага имеется палец, взаимодействующий с пазом, выполненным на водиле. Недостатком мельницы является невозможность получения сверхмелкого измельчения продукта (наименьшая величина зерна основной фракции — 20 мкм), что уменьшает ее технологические возможности.

В работе [7] рассмотрена мельница самоизмельчения, содержащая привод, помольный барабан, установленный на КВ с возможностью свободного поворота. На КВ установлены также противовесы; рычаг жестко закреплен на помольном барабане, а цилиндрический стержень — на основании, взаимодействующем посредством паза с рычагом.

Недостатки данной мельницы — сложность конструкции и наличие поступательной кинематической пары взаимодействия паза с рычагом. Для поступательной кинематической пары пока не решена проблема надежного смазывания и, кроме того, эта пара, как правило, является парой скольжения, что обуславливает ее быстрое изнашивание. Наличие поступательной кинематической пары ограничивает частоту вращения помольного барабана (не более  $1000 \text{ мин}^{-1}$ ), так как такая пара несимметрична и ее трудно динамически уравновесить. Это не позволяет получить сверхмелкое измельчение продукта (наименьшая величина зерна основной фракции — 10 мкм). Вследствие этих недостат-

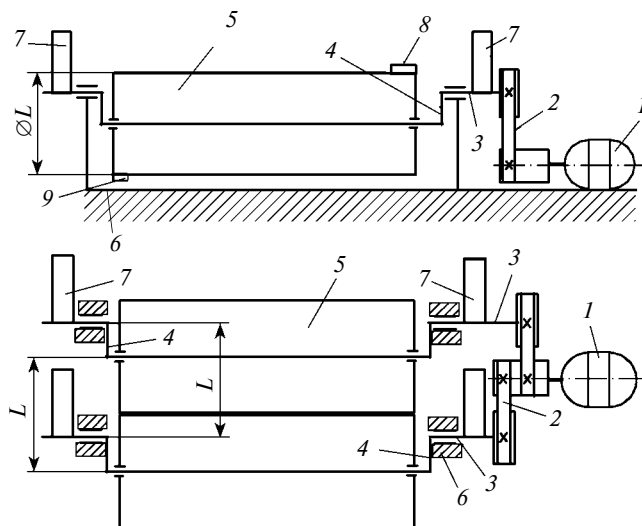


Рис. 1. Кинематическая схема мельницы

ков повышается стоимость мельницы и сужаются ее технологические возможности.

В связи с этим автором предлагается улучшенная конструкция мельницы самоизмельчения [8], которая вследствие этого имеет меньшую стоимость и позволяет получать сверхмелкое измельчение продукта (наименьшая величина зерна основной фракции —  $5 \div 10 \text{ мкм}$ ) путем увеличения частоты вращения свыше  $1000 \text{ мин}^{-1}$ , что расширит ее технологические возможности.

Мельница состоит из двигателя 1 (рис.1), который через ременные передачи 2 вращает два одинаковых кривошипных вала 3 с кривошипами 4. На каждый КВ 3 надет цилиндрический помольный барабан-камера 5 с возможностью свободного поворота вокруг КВ 3. Наружный диаметр каждого помольного барабана-камеры 5 равен расстоянию  $L$  между осями вращения КВ 3. Помольные барабаны-камеры жестко соединены друг с другом (например, сваркой). Двигатель 1 и КВ 3 установлены на неподвижном основании 6. На каждом КВ 3 установлены два противовеса 7 (по одному с каждой стороны от помольного барабана 5). На каждом помольном барабане-камере сверху имеется загрузочный люк 8, снизу — выгрузной патрубок 9.

Мельница работает следующим образом. Через загрузочный люк 8 в каждый помольный барабан-камеру 5 загружается сырье (примерно половина объема барабана-камеры), после чего люк 8 герметично закрывается. После загрузки включается двигатель 1, вращающий одновременно два КВ 3 с кривошипами 4. При вращении кривошипов 4 помольные барабаны-камеры 5 начинают совершать колебательное движение (как цельный шатун в параллелограммном механизме) с частотой  $n$ . Загрузочный люк 8 находится всегда сверху.

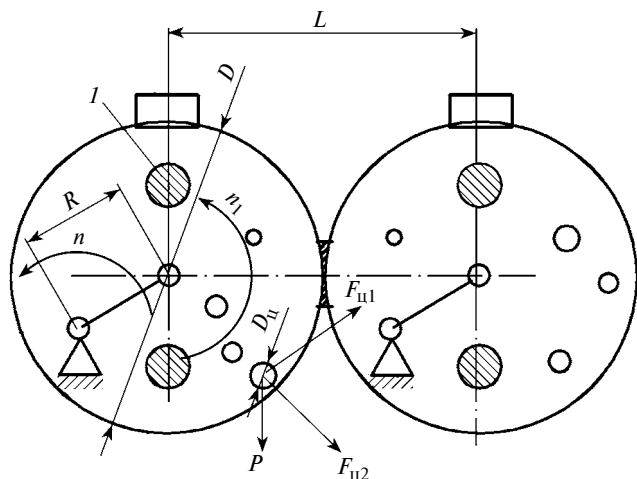


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу сырья

В помольном барабане-камере находится множество частиц измельчения, имеющих поперечный размер, в среднем равный  $D_{\text{ч}}$ , и массу  $m$  (рис. 2). На каждую частицу сырья, находящегося в барабане-камере, действуют сила тяжести  $P$ , центробежная сила  $F_{\text{ц1}}$ , которая начинает двигать частицу по периметру цилиндрического помольного барабана-камеры; при этом возникает вторая центробежная сила  $F_{\text{ц2}}$ , направленная по радиусу помольного барабана-камеры. Частицы начинают кружиться в барабане-камере с частотой  $n_1$ , которая меньше частоты  $n$  вследствие сталкивания частиц между собой и их взаимного торможения при соприкосновении друг с другом.

Частицы, находясь на разном расстоянии от центра барабана-камеры и обладая разной массой, вращаются с разными частотами и имеют разные линейные скорости. При столкновении частиц на очень высокой скорости и трении друг о друга происходит их интенсивное разрушение. Для усиления процесса измельчения в помольном барабане-камере можно поставить неподвижные стержни 2, в которые периодически будут попадать частицы сырья. Это также будет способствовать процессу измельчения. Процесс вращения сырья может продолжаться достаточно долго, пока работает двигатель (см. рис. 1). Для создания такого движения с большой частотой не требуется много энергии. После окончания времени цикла работы мельницы двигатель 1 останавливается, через выгрузной патрубков 9 производится высыпание готового продукта из помольного барабана-камеры 5, после чего цикл повторяется.

Симметричная форма помольного барабана-камеры относительно центра вращения, отсутствие неуравновешенных рычагов и других выступающих элементов (рис. 3) позволяют получить высокий уровень динамической уравновешенности за счет противовесов 1. Центробежная сила  $F_{\text{пр}}$  противо-

веса 7 равна приведенной центробежной силе  $F_{\text{п.6}}$  помольного барабана-камеры, расположена с ней на одной прямой и направлена в противоположную сторону. Следовательно, эти силы взаимно уничтожаются. Высокая динамическая устойчивость мельницы, отсутствие поступательных кинематических пар позволяют получить большую частоту вращения валов 2 (до  $2000 \text{ мин}^{-1}$ ), что определяет значительную производительность агрегата и измельчение сырья ориентировочно до  $5 \div 10 \text{ мкм}$  (основная фракция).

Рассчитаем значение центробежной силы  $F_{\text{ц1}}$ , действующей на частицу сырья (см. рис. 2). Примем  $m = 10^{-3} \text{ кг}$ ,  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ , длину кривошипа  $R = 0,01 \text{ м}$ . Получим:

$$F_{\text{ц1}} = mR \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 = 0,438 \text{ Н.}$$

Сила гравитации, действующая на частицу:

$$P = mg = 0,0098 \text{ Н,}$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Центробежная сила  $F_{\text{ц1}}$  в 45 раз больше силы гравитации  $P$ .

Приняв диаметр помольного барабана-камеры  $D = 0,3 \text{ м}$ , получим максимальную скорость  $v$  движения частицы:

$$v = \pi D n = 1884 \text{ м/мин (31,4 м/с).}$$

Если учесть, в худшем варианте, что реальная сила воздействия и скорость движения будут в несколько раз меньше, все равно этого будет вполне достаточно для эффективного измельчения.

Рассчитаем мощность привода мельницы. Примем исходные данные: частота вращения вала  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; длина кривошипа  $R = 0,01 \text{ м}$ ; масса одного загруженного помольного барабана  $m_{\text{п.6}} = 135 \text{ кг}$  (масса продукта измельчения составляет в этой массе не менее  $50 \text{ кг}$ ); средний диаметр подшипника  $D_1 = 60 \text{ мм (0,06 м)}$ ; средний диаметр подшипника  $D_2 = 100 \text{ мм (0,01 м)}$ .

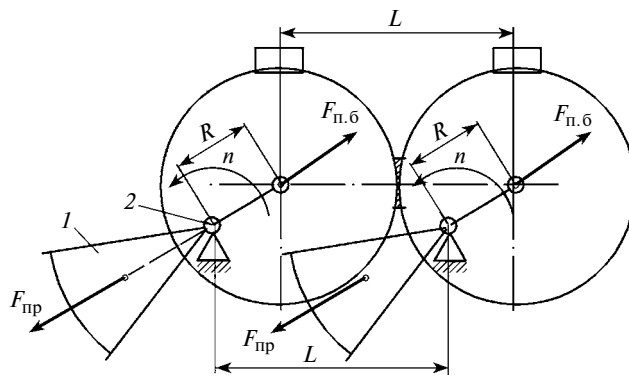


Рис. 3. Схема динамического уравновешивания мельницы

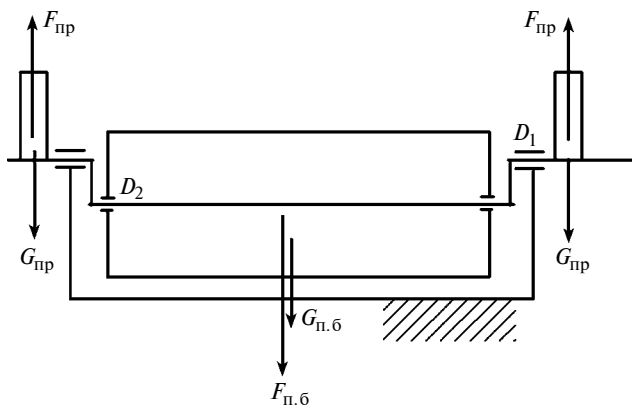


Рис. 4. Схема для расчета мощности привода

Решение.

1. Определим центробежную силу от помольного барабана  $F_{п.б}$  (рис. 4):

$$F_{п.б} = m_{п.б} R \omega^2 = m_{п.б} R \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 = 59\,158 \text{ Н.}$$

Данная сила активно воздействует на подшипник диаметром  $D_2$ . На подшипник диаметром  $D_1$  эта сила не воздействует. Она уравновешивается действием центробежных сил противовесов  $F_{пр}$ . Центробежная сила  $F_{п.б}$  намного превосходит все остальные силы в механизме.

2. Рассчитаем силу трения  $F_{тр1}$  в подшипнике диаметром  $D_1$ , приняв коэффициент трения  $f_{тр} = 0,02$ :

$$F_{тр1} = m_{п.б} g f_{тр} = 26,46 \text{ Н.}$$

3. Рассчитаем силу трения  $F_{тр2}$  в подшипнике диаметром  $D_2$ , приняв коэффициент трения  $f_{тр} = 0,02$ :

$$F_{тр2} = (F_{п.б} + F_{тр1}) f_{тр} = 1184 \text{ Н.}$$

4. Определим крутящий момент  $M_{тр1}$  трения в подшипнике диаметром  $D_1$ :

$$M_{тр1} = F_{тр1} \frac{D_1}{2} = 0,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Определим крутящий момент  $M_{тр2}$  трения в подшипнике диаметром  $D_2$ :

$$M_{тр2} = F_{тр2} \frac{D_2}{2} = 59,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Определим мощность  $N$  двигателя для одного помольного барабана:

$$N = (M_{тр1} + M_{тр2}) \omega = (M_{тр1} + M_{тр2}) \frac{\pi n}{30} = 12\,555 \text{ Вт.}$$

7. Определим мощность  $N_d$  для двух помольных барабанов с учетом коэффициента запаса мощности  $K = 1,2$ :

$$N_d = 2NK = 30\,132 \text{ Вт.}$$

При этой мощности двигателя мельница за один цикл обрабатывает примерно 100 кг сырья. Цикл может продолжаться от 5 до 15 мин.

Ниже приведены мощности  $N_d$  двигателя при разных частотах  $n$  вращения вала помольного барабана:

$n, \text{ мин}^{-1}$	$N_d, \text{ Вт}$
750	1722
1000	3921
1500	12 848
2000	30 132

### Выводы

Согласно приведенным данным предлагаемая центробежная мельница тонкого самоизмельчения продукта позволит разогнать частицу сырья до высокой скорости, что обеспечит большую энергию взаимодействия частиц между собой и сильный удар при встрече с препятствием. Этот процесс можно поддерживать неограниченно долго без затрат большого количества энергии и средств. Это дает возможность получить эффективный процесс измельчения сырья до зерен малой величины, с размерами зерен основной фракции до  $5 \div 10$  мкм.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Применение** ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья / А. В. Аксенов, А. А. Васильев, А. А. Швец, В. Н. Охотин // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 2. С. 20—25.
2. **Акунов В. И.** Струйные мельницы — элементы теории и расчета. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1967. 265 с.
3. **Липилин А. Б., Векслер М. В., Коренюгина Н. В.** Ударная шаровая мельница "Трибокнетика" или новая техника механического диспергирования // <http://www.tribor.ru/tribokinet.html>.
4. **Аскарлов Е. С.** Центробежно-гирационная мельница с приводом на основе кулисного механизма // Вестник машиностроения. 2003. № 9. С. 79—81.
5. **Аскарлов Е. С.** Центробежно-гирационные мельницы: особенности конструкции и расчет // Вестник машиностроения. 2008. № 2. С. 86—88.
6. **Пат. 6175 РК:** МПК В02С17/08 Центробежно-кулисная одновальная мельница.
7. **Пат. 14898 РК:** МПК В02С17/08 Центробежная мельница самоизмельчения.
8. **Пат. 33616 РК:** МПК В02С17/08 Центробежная мельница тонкого самоизмельчения.

# Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

(под общей редакцией вице-президента ассоциации  
инженеров-трибологов России, д-ра техн. наук А. Ю. Албагачиева)

УДК 621.891

И. А. МЕДЕЛЯЕВ, д-р техн. наук (Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха),  
e-mail: medd\_ia@mail.ru

## Контактное взаимодействие деталей машин при смазывании

Исследованиями контактных взаимодействий деталей машин при смазывании установлено влияние шероховатости сопряженных поверхностей и используемого смазочного материала на особенности контакта в парах трения из стали и бронзы. Показана возможность улучшения функциональных показателей узла трения оптимизацией эксплуатационной шероховатости контактных поверхностей.

**Ключевые слова:** трение, изнашивание, смазочный материал, смазочная пленка, поверхность, шероховатость, контакт, температура.

Contact interactions of mating machine parts during lubrication are studied. The influence of the roughness of the mating surfaces and the lubricant used on the work of a friction pair of steel and bronze is determined. The possibility of improving the functional parameters of the friction unit by optimizing the operational roughness of the contact surfaces is shown.

**Keywords:** friction, wear, lubricant, lubricant film, surface, roughness, contact, temperature.

Одним из основных факторов, определяющих изнашивание пар трения, является шероховатость их поверхностей. При трении неровности сопряженных поверхностей, взаимодействуя друг с другом, деформируются. В зависимости от условий трения и структуры шероховатостей этот процесс изменяется от упругой деформации неровностей до глубинного вырывания.

Интенсивное деформирование и смятие вершин выступов шероховатых поверхностей происходит в процессе их приработки до тех пор, пока неровности не примут более устойчивые формы и размеры, в результате чего увеличивается пятно контакта. При этом выступы приобретают оптимальную кривизну, обеспечивающую наибольшую устойчивость смазочной пленки на поверхностях трения.

Если такую шероховатость контактирующих поверхностей создать механической обработкой, то изнашивание и продолжительность приработки по-

верхностей пары трения будут минимальными. Такая шероховатость будет оптимальной эксплуатационной шероховатостью для данной пары трения.

На сегодняшний день влияние эксплуатационной шероховатости сопряженных поверхностей на процессы трения и изнашивание при смазывании, а также влияние микрогеометрии сопряженных поверхностей и смазочных материалов на их взаимодействие исследованы не в полной мере, поэтому изучение данных вопросов является весьма актуальным.

Цель настоящей работы — поиск оптимальных эксплуатационных шероховатостей поверхностей трения, получаемых финишной обработкой, и исследование влияния микрогеометрии поверхностей и смазочного материала на контактное взаимодействие в паре трения.

Результаты экспериментальных исследований [1—3] показали, что удельная мощность трения  $P_{\text{пр}}v$  ( $P_{\text{пр}}$  — предельная удельная нагрузка,  $v$  — скорость скольжения) для пары трения с поверхностями разной шероховатости изменяется по-разному при изменении толщины смазочного слоя, которая определяет границы схватывания материалов контактирующих поверхностей пары трения и начало их критического изнашивания.

На рис. 1 показаны зависимости изменения предельной нагрузки  $P_{\text{пр}}$  от скорости  $v$  скольжения при разных сочетаниях (см. таблицу) параметров

Номер пары трения	$Rz$ , мкм	
	Сталь Х12Ф1	Бронза БрОСН 10-2-3
1	0,08	0,16
2	0,16	0,32
3		0,63
4		1,25
5		2,50
6	0,32	2,50



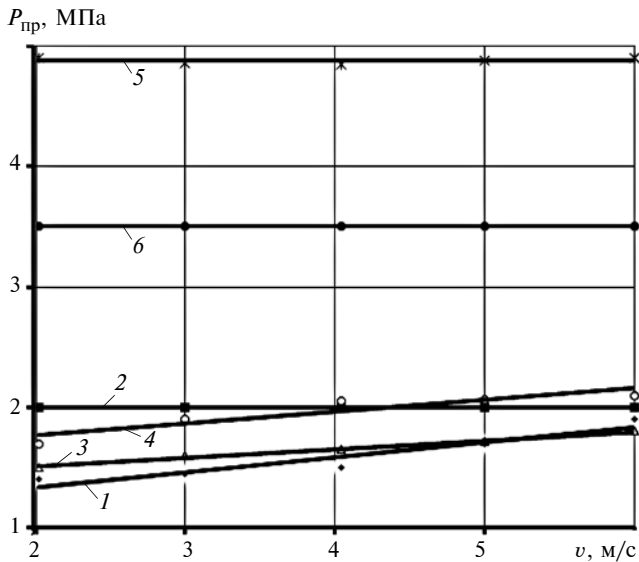


Рис. 1. Зависимости предельной нагрузки  $P_{пр}$  от скорости  $v$  скольжения при разных сочетаниях параметров  $Rz$  (см. таблицу) в парах трения со смазочным материалом АМГ-10 при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $K_{вз} = 1$

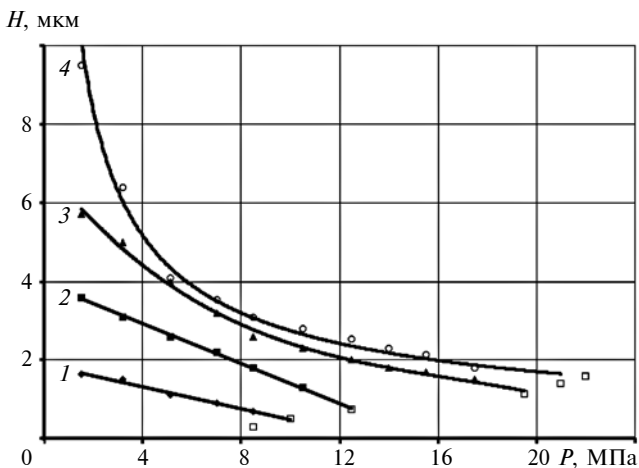


Рис. 2. Зависимости толщины  $H$  смазочного материала 7-50с-3 от удельной нагрузки  $P$  в парах трения из стали Х12Ф1 ( $Rz = 0,08\text{ мкм}$ ) и бронзы БрОСН 10-2-3 ( $Rz = 0,16\text{ мкм}$ ) при  $v = 2$  (1); 4 (2); 6 (3); 8 м/с (4),  $K_{вз} = 0,8$ ,  $T = 125\text{ }^\circ\text{C}$  и торцевом биение  $\delta = 60\text{ мкм}$  (наименьшее значение  $H$  у каждой кривой соответствует предельной толщине смазочного слоя)

шероховатости контактирующих поверхностей пар трения со смазочным материалом АМГ-10 при нормальной температуре ( $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) и коэффициенте взаимного перекрытия  $K_{вз} = 1$ .

Толщина смазочного слоя в паре трения с увеличением нагрузки при постоянной скорости скольжения снижается (рис. 2). С повышением предельной толщины смазочного слоя предельная удельная мощность трения увеличивается линейно.

Максимальная удельная мощность трения наблюдается у пары трения из стали и бронзы, сопряженные поверхности которых имеют параметр шероховатости соответственно  $Rz = 0,16$  и  $2,5\text{ мкм}$ .

Минимальная удельная мощность трения наблюдается в паре трения из стали и бронзы, поверхности которых имеют соответственно параметр шероховатости  $Rz = 0,08$  и  $0,16\text{ мкм}$ . У всех пар трения при увеличении нагрузки наблюдается снижение коэффициента трения. При одинаковой нагрузке и постоянной скорости скольжения повышение параметра шероховатости поверхностей контакта приводит к повышению коэффициента трения (рис. 3).

При одинаковой нагрузке повышения скорости скольжения и параметра шероховатости контактных поверхностей повышают коэффициент трения. Предельный коэффициент трения, определяемый удельной мощностью трения, зависит от температуры смазочного материала на входе в узел трения и шероховатости контактных поверхностей, которые, в свою очередь, определяют толщину смазочной пленки между поверхностями трения: чем больше шероховатость, тем выше толщина смазочной пленки [1].

Независимо от скорости скольжения, удельной нагрузки и температуры смазочного материала на входе в узел трения коэффициент трения и плотность теплового потока имеют наименьшие значения в такой паре трения из стали и бронзы, у которой параметр шероховатости контактных поверхностей соответственно  $Rz = 0,16$  и  $2,5\text{ мкм}$ , а наибольший коэффициент трения и плотность теплового потока в паре трения с  $Rz = 0,08$  и  $0,16\text{ мкм}$ .

Таким образом, установлены оптимальные эксплуатационные шероховатости поверхностей пары трения из стали и бронзы:  $Rz = 0,16$  и  $2,5\text{ мкм}$  соответственно. Суммарная скорость изнашивания пары трения из стали и бронзы аналогична скорости изнашивания пары трения с  $Rz = 0,08$  и  $0,16\text{ мкм}$ . При этом удельная мощность трения для пары с

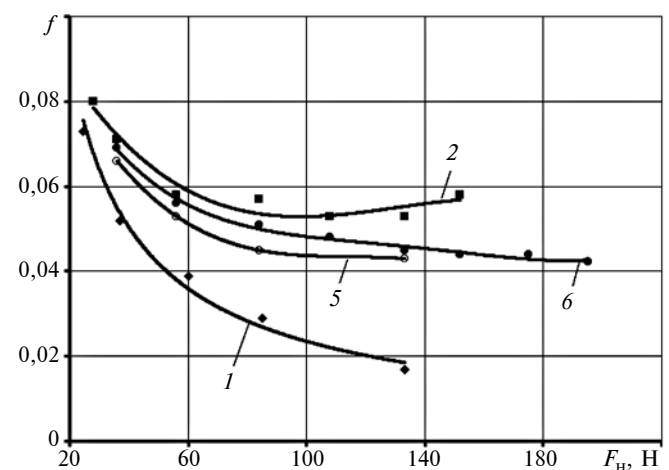


Рис. 3. Зависимости коэффициента  $f$  трения от нормальной нагрузки  $F_n$  при разных сочетаниях параметра  $Rz$  контактных поверхностей (1, 2, 5, 6 — см. таблицу) пар трения из стали Х12Ф1 и бронзы БрОСН 10-2-3 со смазочным материалом АМГ-10 при  $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 2\text{ м/с}$  и  $K_{вз} = 0,035$

оптимальными эксплуатационными параметрами шероховатости поверхностей трения в 2–3 раза выше, чем для пары трения из стали и бронзы с  $Rz = 0,08$  и  $0,16$  мкм.

Минимальная удельная мощность трения у пары трения из стали и бронзы с  $Rz = 0,08$  и  $0,16$  мкм обусловлена следующим [1–3]:

с уменьшением шероховатости количество протекающего смазочного материала уменьшается и не обеспечивается регенерация смазочной пленки;

по мере сглаживания неровностей увеличивают радиусы скругления вершин, увеличивается пятно контакта и путь истирания смазочной пленки, а в результате ухудшения поступления смазочного ма-



Рис. 4. Схема работы пары трения

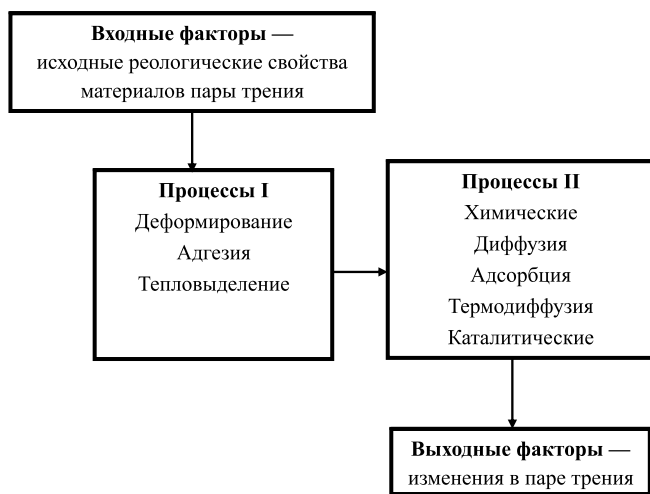


Рис. 5. Схема физических процессов в паре трения скольжения

териала ухудшаются условия восстановления смазочной пленки;

на поверхности с меньшей шероховатостью (более гладкая поверхность) смазочная пленка удерживается хуже;

при более гладких поверхностях шероховатость не создает масляных микрорезервуаров, что может стать причиной возникновения сухого трения (без смазочного материала), повышения изнашиваемости, а при значительном нагружении возможно контактное схватывание сопряженных поверхностей.

Исследования показали следующее:

микрogeометрия контактирующих поверхностей значительно влияет на удельную мощность трения и определяет частоту взаимодействия поверхности материала (детали из бронзы) и время его нахождения в контакте с поверхностью контртела (детали из стали);

при уменьшении параметра  $Rz$  шероховатости поверхности и расстояния между выступами шероховатой поверхности насыщенный контакт возникает при меньших нагрузках [4];

для поверхностей с низкой шероховатостью (12-й класс шероховатости и выше) и большими радиусами скругления вершин неровностей фактическая площадь контакта на микроуровне может на порядок и более превосходить физическую площадь контакта неровностей на наноуровне [5]. Разница площадей контакта может повлиять на теплопроводности контакта и другие процессы взаимодействия (адгезионное, фрикционное изнашивания), протекание которых происходит в зонах непосредственного атомарного взаимодействия контактирующих поверхностей;

наличие смазочного материала в зазоре между шероховатыми поверхностями уменьшает фактическую зону контакта, деформационную составляющую силы трения, коэффициент трения для определенного диапазона скоростей скольжения [4, 6].

С учетом результатов экспериментальных исследований рассмотрим особенности контакта в паре трения со смазочным материалом.

Известно, что в паре трения со смазочным материалом в ходе эксплуатации изменяются параметры исходных контактирующих поверхностей и взаимодействие сопряженных поверхностей, создаются так называемые эксплуатационные шероховатости, воспроизводимые при стационарном трении [1].

Работу пары трения можно представить в виде системы с входными и выходными факторами (рис. 4) или как систему непрерывно повторяющихся физических процессов в зоне контакта пары трения со смазочным материалом с учетом всех факторов и их взаимосвязей (рис. 5).

На рис. 4 использованы обозначения:  $P$  — удельная нагрузка;  $v$  — скорость трения;  $f$  — ко-

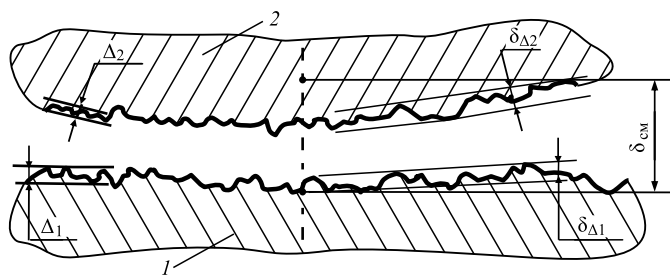


Рис. 6. Схема контакта двух тел (1 и 2) антифрикционной пары трения при наличии смазочной пленки

эффицент трения;  $\tau$  — сопротивление сдвигу;  $h$  — износ;  $H$  — толщина смазочного слоя;  $T$  — температура смазочного материала на входе в узел трения;  $T_H$  — температура смазочного материала в смазочном слое;  $T_\omega$  — температура поверхности трения;  $T_f^*$  — предельная температура смазочного материала;  $q$  — плотность теплового потока.

Машиностроительные изделия, как правило, до эксплуатации подвергаются технологической приработке (обкатке), в ходе которой и создается оптимальная эксплуатационная шероховатость сопряженных поверхностей пар трения.

Рассмотрим пары трения с условно "гладкими" поверхностями (абсолютно гладких поверхностей нет) из сталей и цветных сплавов с покрытиями или без них, разделенные слоем смазочного материала. Схема взаимодействия условно гладких поверхностей соответствует работе идеальной пары трения (рис. 6).

На рис. 6 использованы обозначения:  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — толщины подслоя в смазочной пленке на поверхности соответственно тел 1 и 2;  $\delta_{\Delta_1}$  и  $\delta_{\Delta_2}$  — геометрические факторы шероховатостей соответствующих поверхностей;  $\delta_{\min} = k_B(\delta_{\Delta_1} + \delta_{\Delta_2})$  — минимальная толщина смазочной пленки ( $k_B$  — коэффициент, учитывающий волнистость поверхностей, влияющую на сохранение пленки при относительном движении тел в паре при условии существования пленки).

Сначала будем рассматривать приработанные пары трения, а затем — процесс их приработки.

Поверхности деталей не являются абсолютно гладкими, поэтому для пар трения приняты три площади контакта: номинальная площадь  $A_a$ , контурная площадь  $A_c$ , фактическая площадь  $A_f$ .

Для пары трения из стали и бронзы со смазочным материалом контурная и номинальная площади контакта зависят от режима трения и определяются жестким и умеренным взаимодействиями сопряженных тел [1]. Жесткому взаимодействию соответствует пятно контакта с площадью  $A_{c,ж}$  при максимальном сближении сопряженных поверхностей под нагрузкой. Умеренному взаимодействию соответствует пятно контакта с площадью  $A_{c,у}$  при

наименьшем сближении сопряженных поверхностей, т. е. при максимальной толщине смазочного материала.

Следовательно, контурная площадь составит  $A_c = A_{c,ж} + A_{c,у}$ .

Работоспособность пары трения определяют выражения:  $A_{c,ж}/A_c = \bar{A}_{c,ж}$ ;  $A_{c,у}/A_c = \bar{A}_{c,у}$ , т. е. при  $\bar{A}_{c,ж} \rightarrow 1$  пара трения неработоспособна; условие  $\bar{A}_{c,у} \rightarrow 1$  реализуется без нормальной нагрузки или при очень малых механических и тепловых фрикционных нагрузках.

Зоны жесткого и умеренного взаимодействий определяют интенсивность и масштабы основных физических процессов в паре трения [1].

### Контурный режим трения

Дискретность в пятне контакта пары трения со смазочным материалом предопределяет нестационарность основных процессов — пятна жесткого и умеренного взаимодействий поверхностей возникают, существуют и исчезают за очень короткое время. Однако эксперименты показали, что для исследуемых трибосопряжений при контурном трении наблюдается стационарность процессов трения и изнашивания с минимальным изнашиванием, что возможно при динамическом равновесии основных процессов [7, 8].

Постоянные минимальные значения коэффициента трения при контурном трении обусловлены особенностями самого контакта и свойствами смазочной пленки:

при трении со смазочным материалом в процессе участвуют все номинальные поверхности контакта, разделенные слоем смазочного материала, т. е. площадь  $A_a$ ;

жесткость взаимодействия двух тел, толщина пленки, распределение нагрузки и удельного сопротивления имеют дискретные характеры;

дискретность имеет определенную структуру.

При изготовлении пар трения стремятся к получению наибольшей плоскостности и максимальной равномерности прилегания контактных поверхностей, насколько возможно. При этом нормальный режим при контурном трении не нарушается, коэффициент трения и интенсивность изнашивания имеют минимальные значения [1—3].

### Термоупругая неустойчивость контакта

В паре на поверхности каждого тела образуется термоупругая волна (выпучивание материала), продольная ось которой ориентирована вдоль вектора скорости относительного перемещения двух тел [9]. Эффект выпучивания и создает контурный контакт двух тел, что приводит к определенному изнашиванию. При этом имеют место зоны жесткого вза-

имодействия (контурное трение) и зоны охлаждения. На контурной площади контакта тонкая смазочная пленка обладает свойствами упрочнения под действием нормальной нагрузки [1].

### **Свойства смазочной пленки в контакте**

При контурном трении смазочная пленка создает эффекты антифрикционности и шелевого теплопереноса [10]. Совместное проявление данных эффектов на макро- и микроуровне позволяет детализировать структуру контакта двух тел и смазочной пленки: для толщин  $\delta_{см}$  смазочной пленки в зонах контурного трения ( $l_{тр}$ ) и охлаждения справедливо выражение  $\delta_{тр.пл} < \delta_{ох.пл}$ .

Реальные тела обладают всеми реологическими свойствами: упругостью, вязкостью, пластичностью, прочностью, но в разной степени. Учитывая специфику работы смазочного материала в сопряжениях при трении под нагрузкой, очевиден вывод о том, что наиболее важными реологическими свойствами пленки в паре трения являются упругость, прочность по нормали к поверхности контакта и свойства вдоль вектора скорости относительного перемещения двух тел (пластичность и пластичность в сочетании с вязким поведением). Данные свойства формируют специфику прочностных свойств пленки на срез, который проявляется при трении антифрикционных факторов: изменения коэффициента трения и величины сопротивления сдвигу.

Важную роль в работе исследуемых пар играют макротермоупругие эффекты: диффузия, адсорбция, химическое взаимодействие, адгезия, пластическая и упругая деформации. Тонкая смазочная пленка состоит из подслоев, находящихся на поверхностях двух сопряженных тел, и основного объема пленки, которая обладает определенной анизотропией по нормали и касательной к плоскости трения. Сдвиг пленки в плоскости трения обуславливает основные потери при трении.

Материал в подслое смазочной пленки изменяется при эксплуатации механизма. На контактных поверхностях образуются вязкие компоненты из-за интенсивных механических и термохимических воздействий в зонах жесткого взаимодействия, которые при определенных нагрузках могут иметь адгезионные связи с сопряженными поверхностями. При этом сами поверхности являются катализаторами термохимических процессов.

Толщины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  подслоев на составляющих пары трения и их прочности зависят от глубины и степени деформации поверхностей, исходных и приобретенных свойств смазочного материала, качества обкатки сопряженных поверхностей, режимов нагружения.

Толщина  $\delta_{тр.пл}$  смазочного слоя на контурных площадках в зоне  $l_{тр}$  эффективного трения зависит от распределенной нагрузки  $p_c \approx P/A_c$  и сжимаемости пленки под нагрузкой при определенных показателях режима трения ( $p_c, v, T$ ). Толщина пленки в зоне охлаждения составляет:

$$\delta_{ох.пл} = \Delta y_{\Sigma сж}(P, q') + \delta_{тр.пл},$$

где  $\Delta y_{\Sigma сж}$  — сумма высот для обжатых под нагрузкой  $P$  термоупругих волн макроволнистости с удельной плотностью  $q'$  теплогенерирования в результате трения.

Свойства вязкого подслоя зависят от физических и химических свойств и состояния смазочного материала, а также состояния контактных поверхностей, тепловых и механических нагрузок, интенсивности термохимических процессов в смазочном материале на границе с поверхностями трения. Прочность подслоя на сжатие обеспечивает и прочность пленки по нормали к поверхности трения. Пленка в плоскости трения при нормальном трении при высоких удельных нагрузках или находится в пластическом состоянии, или у нее проявляется высокая пластичность в зонах жесткого взаимодействия.

С уменьшением толщины вязкого подслоя пленки прочность на сдвиг повышается, так как нижние слои молекул прочнее связаны с поверхностью сопряженного тела в результате адсорбции и хемосорбции. Сдвиг смазочной пленки сопровождается выделением теплоты и повышением температуры.

В контактной плоскости прочность  $p^*$  смазочной пленки на сжатие превышает сопротивление  $\tau^*$  сдвигу. Это сохраняется во всех случаях при повышении нагрузки  $P$ , температуры  $T$  и скорости  $v$  скольжения вплоть до разрушения смазочной пленки. Пленка, нагруженная распределенной нагрузкой  $p_c$ , имеет запасы по скорости скольжения и температуре (до разрушения). Поэтому момент разрушения пленка существует, но изменяется ее структура. При этом в момент разрушения пленка находится в состоянии, которое можно охарактеризовать как предельное. Такое состояние предопределено также известными законами физико-химических изменений вещества (в данном случае пленки), причем эти изменения по определяющим параметрам ( $p_c, v, T$ ) являются непрерывными и плавными в пределах пространства, отведенного для основных процессов взаимодействия двух тел пары трения и пленки с характерной структурой дискретности контакта. Непрерывность и плавность изменений состояния пленки при изменении нагружения предопределяет существование подслоя сверхтонкой структуры в самой пленке (на поверхности тел) с постепенным переходом в предельное состояние всего смазочного слоя в паре трения.

### ***Влияние газосодержания и воды в смазочном материале на контакт поверхностей трения***

Эксперименты показали, что наличие в смазочном материале избыточного количества воздуха и воды нарушает смазывание поверхностей трения и приводит к интенсификации их износа [11].

Установлено, что с увеличением содержания воздуха в смазочном материале при нормальной температуре коэффициент трения и сопротивление сдвигу повышаются вследствие изменения градиента механических свойств по глубине пограничного слоя. Нагревание смазочного материала способствует снижению коэффициента трения и сопротивления сдвигу, что обусловлено ускорением физико-химических процессов образования смазочных пленок на поверхностях трения и обеспечением положительного градиента механических свойств по глубине пограничного слоя.

Следовательно, газ в смазочном материале в зависимости от его температуры оказывает неодинаковое влияние на область стационарного изменения коэффициента трения: при нормальной температуре повышение содержания газа в смазочном материале уменьшает ее, а при температуре, превышающей нормальную, содержание газа расширяет ее в результате улучшения образования смазочных пленок на поверхностях трения.

Анализ результатов эксперимента показал значительное влияние активации смазочного материала в результате нагревания и выделения фрикционной теплоты на процессы трения и изнашивания [12].

Повышение температуры смазочного материала приводит к следующему:

повышается энергия активации жидкости;

повышается реакционная способность поверхностных слоев материалов трения в результате повышения температуры в поверхностных слоях и смещения констант химических реакций;

происходит дегазация жидкости;

исключается влияние воздуха на образование смазочных пленок и процесс трения;

обеспечиваются мягкие стартовые условия в начале работы пары трения;

предельные температуры смазочных материалов при равных значениях предельной нагрузки и скорости скольжения зависят от вида материала.

Фрикционная теплота в зоне трения влияет:

на формирование контакта двух тел;

на формирование макрогеометрии сопряженных поверхностей и изменение свойства смазочной пленки в результате термохимического взаимодействия;

на взаимодействие смазочного материала и поверхностей пары трения.

Из вышесказанного следует, что на процесс образования смазочных пленок можно воздействовать следующим образом:

изменением температуры смазочного материала;

изменением скорости скольжения, значительно влияющей на температуру сопряженных поверхностей, которые становятся катализаторами физико-химических процессов, что снижает потенциальную энергию системы и увеличивает число молекул в химическом процессе;

повышением газосодержания в смазочном материале (при температуре  $> 20$  °С);

регулированием фрикционного тепловыделения, обеспечением динамического равновесия между образованием и разрушением смазочных пленок на контактных поверхностях.

### ***Твердость поверхностей контакта***

Эксперименты по определению твердости поверхностей трения и изменению коэффициента трения [1] в зависимости от режимных параметров ( $P$  и  $v$ ) процесса трения показали, что в контактной зоне изменяется физическое состояние смазочной пленки, которая приобретает свойства квазиупругого твердого тела с низким сопротивлением сдвигу, а твердость поверхностей трения практически не изменяется. Твердость сопряженных поверхностей не изменяется и при изменении вида смазочного материала.

Таким образом, проведенные исследования позволили оценить влияние микрогеометрии поверхностей трения, смазочного материала и особенности контакта пар трения из стали и бронзы. Установлена оптимальная эксплуатационная шероховатость контактных поверхностей. Показана возможность улучшения функциональных показателей узлов трения оптимизацией шероховатостей контактных поверхностей и создания на них смазочных пленок [13—15].

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ**

1. **Меделяев И. А., Албагачиев А. Ю.** Трение и износ деталей машин. М.: Машиностроение, 2008. 462 с.
2. **Приходько В. М., Меделяев И. А., Фатюхин Д. С.** Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами. М.: МАДИ, 2015. 264 с.
3. **Меделяев И. А., Волобуев А. В., Безовский А. В.** Обеспечение работоспособности деталей машин. М.: Авторская мастерская, 2017. 158 с.
4. **Горячева И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
5. **Измайлов В. В., Чаплыгин С. А.** Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 6. <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf>. DOI: 10.15862/10TVN614
6. **Трение** эластомеров. Моделирование и эксперимент / И. Г. Горячева, Ю. Ю. Маховская, А. В. Морозов,

А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, д-р техн. наук (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), М. Е. СТАВРОВСКИЙ, д-р техн. наук (Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходами), М. И. СИДОРОВ, д-р техн. наук, А. В. РАГУТКИН, канд. техн. наук (МИРЭА, г. Москва), e-mail: albagachiev@yandex.ru

## Обратные задачи кинетики накопления повреждений и разрушения материалов при трении

Разработаны кинетические схемы процессов зарождения и образования одномерных, двумерных и трехмерных ядер схватывания на контакте при трении. Результаты анализа данных по растяжению, знакопеременному изгибу, росту магистральной макротрещины показали, что они хорошо аппроксимируются квази-вейбулловским распределением. Получено экспериментальное подтверждение адекватности модели обратной задачи.

**Ключевые слова:** обратная задача, трение, схватывание, ядра, сплошность, кинетика разрушение, модель, программа.

Kinetic schemes of the processes of nucleation and formation of one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional seizure cores at the contact during friction are developed. The analysis results of data on tension, alternating bending, and growth of the main macrocracks showed that they are well approximated by the quasi-Weibull distribution. Experimental confirmation of the adequacy of the inverse problem model is obtained.

**Keywords:** inverse problem, friction, seizure, cores, continuity, fracture kinetics, model, program.

Одной из серьезных проблем таких наукоемких отраслей, как двигателестроение и ракетостроение, является обмен информацией между специалистами, создающими и эксплуатирующими изделие. Так как разные группы специалистов используют

отличающиеся по уровню детальности и обобщения физические представления и соответствующий математический аппарат. Современная техника по разработке математических моделей, а также методы математического моделирования и вычислительного эксперимента позволяют в формализованном виде представить разные по уровню детальности описания характеристик материалов, технологических процессов производства и процессов изнашивания материалов при эксплуатации.

Решение многих проблем достигается интерпретацией экспериментальных результатов, целью которой является предоставление разработчикам возможности анализа особенностей поведения материалов при различных условиях нагружения и взаимодействия. Существенную помощь в этом оказывает математическое моделирование обратных задач реконструкции по статистике отказов в ходе накопления повреждений с детализацией их механизмов. Различают два подхода в механике разрушения: с акцентом на анализ напряженно-деформированного состояния зон или сечений; изучение топологии дефектов и анализ функций, определяющих степень поврежденности [8]. Однако согласование подходов даже в рамках одной дисциплины является непростой задачей.

Конструкционные материалы являются метастабильными термодинамическими системами. При-



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 32)

Ф. И. Степанов. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. 204 с.

7. **Меделяев И. А.** Основные закономерности процесса трения и изнашивания в парах трения гидравлических машин // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 42—47.

8. **Меделяев И. А.** Нормальный режим трения и долговечность антифрикционных пар со смазкой при повышенных нагрузках // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 8. С. 32—38.

9. **Меделяев И. А.** Явление термоупругой неустойчивости контакта при смешанной смазке в узлах трения агрегатов транспортной техники // Вестник машиностроения. 2012. № 5. С. 34—39.

10. **Меделяев И. А.** Состояние смазочной пленки на поверхностях контакта при смешанном смазывании в узлах трения транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 28—34.

11. **Меделяев И. А.** Влияние газосодержания и воды в смазочном материале на трение и изнашивание узлов трения в условиях смешанной смазки // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 11. С. 12—15.

12. **Меделяев И. А.** Влияние температуры на работоспособность трибосопряжений двигателей и гидравлических машин транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 28—36.

13. **Меделяев И. А.** Управление работоспособностью узлов трения агрегатов транспортной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 6. С. 28—41.

14. **Меделяев И. А.** Энергетика изнашивания деталей машин при смешанном смазывании // Вестник машиностроения. 2018. № 8. С. 42—48.

15. **Меделяев И. А.** Причины деформаций и изнашивания в трибосопряжениях машин и механизмов и пути их снижения // Вестник машиностроения. 2018. № 11. С. 48—52.

чем в большей степени это относится к металлическим сплавам, в меньшей степени — к керамическим материалам. При этом отдельные локальные зоны отличаются уровнями метастабильности. У кристаллитов наибольшим запасом потенциальной (неуравновешенной) энергии обладают атомы вершин, меньшим — атомы ребер, еще меньшим — атомы поверхностей, наименьшим — атомы внутри кристаллита [2]. Кинетика накопления поврежденных предполагает следующую последовательность: сначала активируются точечные или нуль-мерные дефекты, атомы вершин, зародыши повреждений, затем линейные или одномерные дефекты, атомы ребер, далее поверхностные или двумерные дефекты и в последнюю очередь атомы внутри объема.

После построения прямой задачи — гипотетической кинетики накопления поврежденных ставится обратная задача: подбора кинетических констант модели по экспериментальным данным статистики разрушения материалов. На следующем этапе сравнением нескольких вариантов приемлемой аппроксимации экспериментального распределения предлагается интерпретация механизмов разрушения, т. е. в рамках предложенной модели кинетики анализируется сценарий развития разрушения [3].

Гипотетическая кинетика накопления поврежденных в конструкционном материале строится следующим образом. Предполагается, что процесс образования ассоциированной линейной цепи дефектов можно представить в виде кинетической схемы. В объеме или на поверхности материала присутствуют  $A_0$  одиночных (мономерных) неактивных центров — потенциальных зародышей трещин (дефектов, дислокаций и т. п.). В результате активационного перехода эти зародыши переходят в активно растущие ядра  $A_1$ , которые в последующем присоединяют неактивные дефекты с образованием линейных дислокаций в форме димеров ( $A_2$ ), тримеров ( $A_3$ ) и т. д. Изменение распределения зародышей и активно растущих ядер во времени можно представить в виде системы кинетических дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dA_0}{dt} &= R - k_0A_0; \\ \frac{dA_1}{dt} &= k_0A_0 - k_1A_1; \\ \frac{dA_2}{dt} &= k_1A_1 - k_2A_2; \\ &\dots \\ \frac{dA_i}{dt} &= k_{i-1}A_{i-1} - k_iA_i, \dots, \end{aligned}$$

где  $A_0$  — исходная концентрация зародышей цепи ассоциированных точечных дефектов;  $A_1—A_i$  — цепи ассоциированных дефектов (одномерные дефекты) [4, 5]; начальное условие:  $t_0 = 0$ ,  $A_0 = \text{const}$ ,  $A_i = 0$ ;  $R$  — выражать поток дефектов с поверхности в объем материала или из объема на его поверхность, а также скорость образования зародышей цепи в независимом процессе; для квазистационарного режима можно принять  $R = \text{const}$ , для нестационарного процесса —  $R = R(t)$ .

Данная кинетическая схема подобна схеме Х. С. Багдасарьяна, разработанной для описания кинетики радикальной полимеризации. По предложению Н. Н. Семенова она должна строиться как кинетика цепных реакций, поскольку в этом процессе развитие цепи происходит в результате элементарного акта передачи цепи. Процесс ассоциации активно растущих одномерных ядер и зародышей является конденсационным и поэтому экзотермическим. В связи с этим предполагается, что наращивание цепи сопровождается снижением энергии активации ( $E_A^0 > E_A^1$ ), откуда следует, что можно принять  $k_0 < k_1$ . Для последующих актов наращивания цепи разница в энергиях активации должна снижаться, и для качественного анализа можно принять:  $k_1 = k_2 = \dots = k_i = \dots = k$ . Правомочность этого вытекает также и из того, что в первой реакции перехода участвуют потенциальные зародыши, а в последующих реакциях — активно растущие одномерные ядра.

Для одной из схем принято  $t_0 = 0$ ,  $A_0 = C_0$ ,  $R = 0$ , тогда имеем:

$$\begin{aligned} A_0 &= C_0 \exp\{-k_0 t\}; \\ A_i &= C_0 \frac{k_0}{k - k_0} \left( \frac{k}{k - k_0} \right)^{i-1} \times \\ &\times \left[ \exp\{-k_0 t\} - \left( \sum_{j=1}^{j=i-1} \frac{((k - k_0)t)^j}{j!} \right) \exp\{-kt\} \right]. \end{aligned}$$

Процесс объединения дефектов в цепи идет интенсивно в первые моменты времени, затем дефекты распределяются равномерно по цепям разной величины. Далее происходит объединение растущих линейных цепей и их перекрывание, и, наконец, когда перекрывание цепей пронизывает весь материал в виде сетки, возникает критическая зона, в которой происходит разрушение материала.

При достижении некоторой концентрации и определенных размеров линейных цепей на поверхности и в объеме фазы, происходит поглощение малых цепей большими, начинается процесс интенсивного их объединения и образования сетки микротрещин. Неактивный дефект при такой постановке переходит в активный и порождает цепь или присоединяется к растущей цепи только один

раз, после чего он выбывает из последовательности превращений.

Для интегрального представления введем величину — степень превращения, под которой понимается доля зародышей цепи дефектов, которые вошли в состав растущих линейных ядер ассоциации, т. е. данная величина представляет собой отношение числа дефектов, перешедших в активные ( $C_0(1 - \exp\{-k_0t\})$ ), к общему числу дефектов ( $C_0$ ):  $\alpha = 1 - \exp\{-k_0t\}$ . Это выражение дает относительное число цепей дефектов в начальные моменты времени, т. е. до момента перекрывания цепей, когда их относительная концентрация будет снижаться в результате поглощения малых цепей большими.

Изменение длины одной цепи можно представить как удельную скорость увеличения длины цепи на одно звено:  $\frac{1}{A_i} \frac{dA_{i+1}}{dt} = k$ . Одномерный объем линейного ассоциата увеличивается пропорционально его радиусу  $r = kt$ . Заполнение потенциально возможного одномерного объема одномерных повреждений будет пропорционально концентрации активно растущих ядер ассоциации:  $C_0(1 - \exp\{-k_0t\})$ , и скорости  $kt$  их роста. Запишем зависимость степени превращения как отношение одномерного объема реализованных цепей к одномерному объему всех потенциально возможных цепей:

$$\beta = C_0kt(1 - \exp\{-k_0t\}).$$

Изменение степени превращения имеет вид:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{dt}[F(t)],$$

где  $F(t) = C_0kt(1 - \exp\{-k_0t\})$ .

Изменение  $\beta$  при перекрывании цепей задается уравнением

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{dt}(F(t))(1 - \beta).$$

Этот прием был предложен А. Н. Колмогоровым в работе о статистическом описании процесса кристаллизации.

Интегрирование дает:

$$\beta = 1 - \exp\{-C_0kt(1 - \exp\{-k_0t\})\}.$$

Рассмотрены задача с начальными условиями  $t_0 = 0$ :  $C_0 = 0$ ,  $R = R_0 = \text{const}$ , а также задачи при  $R(t) \neq 0$ . Функция распределения отказов в соответствии с принятым механизмом определяется уравнением  $F(t) = \beta$ .

Функция надежности имеет вид:

$$1 - F(t) = 1 - \beta = \exp\{-C_0kt(1 - \exp\{-k_0t\})\}.$$

Плотность распределения вероятностей накопления повреждений определяется уравнением  $f(t) = dF(t)/dt(\gamma)$ , т. е. будет определяться как

$$\gamma = C_0k \exp\{-C_0kt(1 - \exp\{-k_0t\})\} \times (1 - \exp\{-k_0t\} + k_0t \exp\{-k_0t\}).$$

Эти зависимости подобны распределению Рэлея (распределение Вейбулла при параметре формы кривой распределения  $\alpha = 2$ ). Интенсивность накопления повреждений (интенсивность отказов)  $\lambda(t) = f(t)/[1 - F(t)]$  можно представить в явном виде:

$$\lambda = C_0k(1 - \exp\{-k_0t\} + k_0t \exp\{-k_0t\}).$$

Сравнение с распределением для постепенных отказов Вейбулла показало, что кинетические константы отражают режим нагружения материала, точнее, реализацию механизмов накопления повреждений, как и параметры  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  в распределение Вейбулла, а переменная  $t$  представляет собой долговечность  $N$ . Кинетическая схема процесса накопления повреждений в форме линейных цепей ассоциированных дефектов качественно подобна распределению Вейбулла при параметре формы кривой  $\alpha = 1$  (экспоненциальное распределение) и  $\alpha = 2$  (или  $1 < \alpha \leq 2$ ) (распределение Рэлея). При  $\alpha > 2$  (распределение Вейбулла) качественного подобия нет, что особенно хорошо видно при сравнении плотностей  $f(t)$  и интенсивностей  $\lambda(t)$  элементарных переходов. Для достижения требуемого подобия построена кинетическая схема образования и роста двумерных (поверхностных) и трехмерных (объемных) перекрывающихся микротрещин. Данную кинетическую схему также строили по алгоритму А. Н. Колмогорова для линейно растущих сферических ядер (в одномерном случае шаром является отрезок, в двумерном случае — круг, в трехмерном — шар), которые при росте поглощают ядра, возникшие позднее, а на последней стадии, перекрываясь, полностью заполняют предоставленный им объем (одномерный, двумерный и трехмерный). Эта кинетическая схема фактически соответствует кинетике твердотельных топохимических реакций Б. В. Ерофеева, разработанной им для описания кинетики разложения активных компонентов порохов, твердых топлив и взрывчатых веществ.

В двумерном случае для степени превращения  $\alpha = (S_0^* - S^*)/S_0^*$  получено выражение:

$$\alpha = 1 - \exp\{-At^2[1 - \exp(-k^*t)]\}.$$

Здесь  $A = \pi N_0^* k_R^{*2} / S_0^*$ , где  $N_0^*$  ( $N^*$ ) — начальная (текущая) поверхностная концентрация потенциальных центров в межфазном слое;  $S_0^*$  ( $S^*$ ) — свободная поверхность в начальный (текущий) момент времени;  $k_R^*$  — константа линейного роста активно растущего двумерного ядра;  $k^*$  — кинети-



ческая константа для реакции первого порядка перехода центров из потенциальных в активные, дающие начало росту цепи.

По образованию трехмерных зародышей предполагается, что существует некоторый минимальный критический размер, который определяется балансом свободной энергии компонентов на поверхности в зоне межфазного слоя. Трехмерный зародыш критического размера (гиббсовский зародыш) образуется при реализации нескольких ( $P$ ) последовательных стадий, после чего эти ядра становятся стабильными и дальнейший рост начинается с ( $P + 1$ )-стадии. Предполагается, что с первых стадий роста двумерного ядра начинается рост на их поверхности трехмерных ядер, т. е. существует  $M_0$  число трехмерных зародышей, которое пропорционально поверхности, образованной двумерными ядрами. На начальных стадиях образования трехмерных зародышей  $M$  пропорционально поверхности двумерных ядер, на последующих стадиях — суммарной поверхности как двумерных, так и трехмерных ядер.

Изменение распределения по размерам во времени в предположении первого кинетического порядка задается схемой Х. С. Багдасарьяна:

$$\frac{dM_0}{dt} = -k_0 M_0, \dots, \frac{dM_i}{dt} = k_{i-1} M_{i-1} - k_i M_i,$$

где  $k_i M_i$  — число частиц, присоединившихся в единицу времени к ядрам класса  $i$ , при этом они переходят в класс  $i + 1$  (принимая  $k_0 = k_1 = \dots = k_i = \dots = \tilde{k}$ ). Для степени превращения суммарного потенциального объема трехмерных дефектов с учетом их линейного роста ( $\tilde{k}_R$  — константа скорости радиального роста трехмерного ядра), перекрывания и поглощения меньших большими получено выражение:

$$\chi = 1 - \exp \left[ -\frac{2}{3} \pi \frac{M_{00}}{V_0} \tilde{k}_R^3 t^3 \left( 1 - \exp \{ -\tilde{k} t \} \sum_{i=0}^{P-1} \frac{(\tilde{k} t)^i}{i!} \right) \right],$$

где  $\chi \equiv V_\Sigma / V_0$ ;  $V_\Sigma = \frac{2}{3} \pi M_{00} \tilde{k} \tilde{k}_R^3 t^4$ ;  $V_0$  — исходный объем (часть объема межфазного слоя);  $M_{00} = M_0|_{t=0+\delta}$ ,  $M_{00} = \beta S$ .

Таким образом, функция распределения, отражающая заполнение потенциально возможного

объема микротрещин, растущих статистически, имеет вид:

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ -A t^3 [1 - \exp \{ -B t^2 (1 - \exp \{ -k^* t \}) \}] \times \left[ 1 - \exp \{ -\tilde{k} t \} \sum_{i=0}^{P-1} \frac{(\tilde{k} t)^i}{i!} \right] \right\},$$

$$\text{где } A = \frac{2}{3} \pi \beta \frac{S_0^*}{V_0} \tilde{k}_R^3; B = \pi \frac{N_0^*}{S_0^*} k_R^{*3}.$$

Данное выражение можно представить в функции  $f(t)$  плотности распределения и интенсивности  $\lambda(t)$  потока дефектов. Анализ показал качественное подобие построенного кинетического распределения и распределения Вейбулла, описывающего распределение постепенных отказов механических систем в результате накопления повреждений.

Для решения обратной задачи — получение численных значений кинетических констант сопоставлением кинетического распределения и экспериментального — разработана компьютерная программа. Численные значения данных констант по принятому предположению должны отражать воздействие нагружения на материал, результат которого зависит от свойств материала и режима нагружения. Это предположение было проверено на большом экспериментальном материале [1, 7].

Функция распределения в переобозначенных параметрах имеет вид:

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ -k_1 t^3 [1 - \exp \{ -k_2 t^2 (1 - \exp \{ -k_3 t \}) \}] \times \left[ 1 - \exp \{ -k_4 t \} \sum_{i=0}^{k_5} \frac{(k_4 t)^i}{i!} \right] \right\}$$

$$\left( A = \frac{2}{3} \pi \beta \frac{S_0^*}{V_0} \tilde{k}_R^3 \rightarrow k_1; B = \pi \frac{N_0^*}{S_0^*} k_R^{*3} \rightarrow k_2, \right. \\ \left. k^* \rightarrow k_3, \tilde{k} \rightarrow k_4, p - 1 \rightarrow k_5 \right).$$

Для иллюстрации результатов расчета (таблица) на рис. 1 показаны аппроксимации экспериментальных функций распределения при испытаниях на изгиб образцов листового алюминия со

Рассчитанные кинетические параметры модели

Нагрузка, МПа	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	Рисунок
144,79	0,347	2,353	1,178	3,476	2,500	1, а
179,26	19,014	149,958	25,000	78,569	30,413	1, б
213,74	690,540	411,377	3,097	140,974	18,989	1, в

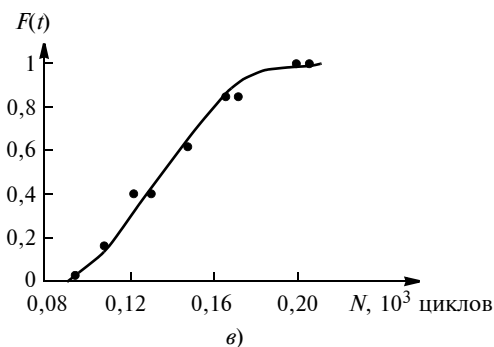
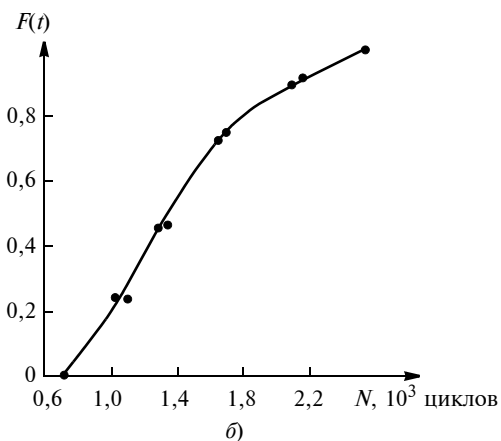
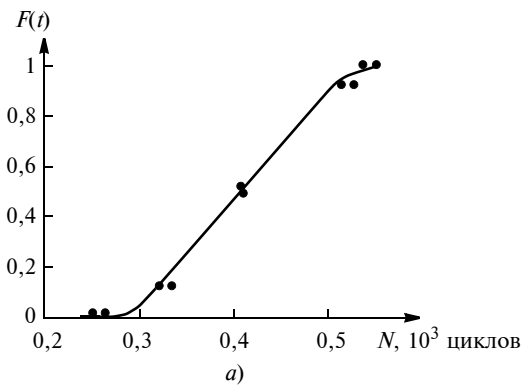


Рис. 1. Аппроксимации экспериментальных функций  $F(t)$  распределения заполнения объемов микротрещин при испытании на изгиб образцов листового алюминия при знакопеременных нагрузках 144,79 (а); 179,26 (б); 179,26 (в) МПа

знакопеременными нагрузками 144,79; 179,26 и 213,74 МПа.

С увеличением нагрузки кинетические константы  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_4$  повышаются. В сложных константах  $k_1$  и  $k_2$  присутствуют параметры, отражающие показатели материала, и кинетические константы, отражающие процесс накопления повреждений. В  $k_1$  входит  $\tilde{k}_R$  (константа скорости линейного роста трехмерного ядра после формирования гиббсовского зародыша). Следовательно, с повышением нагрузки увеличивается скорость формирования трехмерных микротрещин в виде поровой структуры. Это вполне закономерно. Данный вывод будет

справедлив и для константы  $k_2$ , в которую входит  $k_R^\circ$  (константа, отражающая линейную скорость роста двумерного ядра — микротрещины, которую можно представить как удельный поток мономерных дефектов на поверхность растущего ядра), т. е. с повышением нагрузки можно ожидать повышение скорости формирования двумерных трещин. С повышением нагрузки монотонно увеличивается и константа  $k_4$  [ $\tilde{k}$  — константа скорости роста и разрушения (схлопывания) трехмерного ядра (микроразрушения), т. е. перехода из класса  $i$  в класс  $i + 1$  в начале формирования гиббсовского зародыша], что является закономерным.

Другой характер изменения наблюдается для кинетических констант  $k_3$  и  $k_5$ : отсутствует монотонность изменения при повышении нагрузки. Константа  $k_3$  представляет собой переобозначенную константу  $k^*$  для реакции первого порядка перехода центров из потенциальных в активные, дающие начало росту цепи ассоциирующихся дефектов. Константа  $k_5$  отражает число стадий, необходимых для формирования трещины, которая по обратимости и размеру является аналогом гиббсовского зародыша ( $k_5 = p - 1$ ). Для константы  $k_5$  увеличение нагрузки приводит к росту числа захлопываний микропор (микротрещин), что может быть связано с большими деформациями при больших нагрузках. В то же время дальнейшее увеличение нагрузки может давать меньший эффект схлопывания микропор.

В рамках обратных задач в соответствии с кинетическим квазивейбулловским распределением обработаны данные по испытаниям стальных образцов из пруткового проката при разных температурах растягивающей пульсирующей нагрузкой; по испытаниям резца на изнашивание; надрезанных образцов из листовой стали на малоцикловую усталость; статистические данные роста длины макротрещины; данные, качественно соответствующие кинетическому квазиэлеевскому распределению: испытания вала на изгиб при вращении и шариков подшипников качения; статистические данные по испытаниям, в которых явно проявлялась неоднородность выборки образцов.

Анализ данных по растяжению, знакопеременному изгибу, росту магистральной макротрещины под статической нагрузкой показал, что они хорошо аппроксимируются с квазивейбулловским распределением, что в рамках кинетической модели соответствует большому вкладу в накопление повреждений двумерных перекрывающихся микротрещин, но на заключительном процессе накопления всех видов повреждений разрушение, соответствующее в рамках принятой кинетической концепции нарушению сплошности материала, происходит в основном в результате формирования структуры

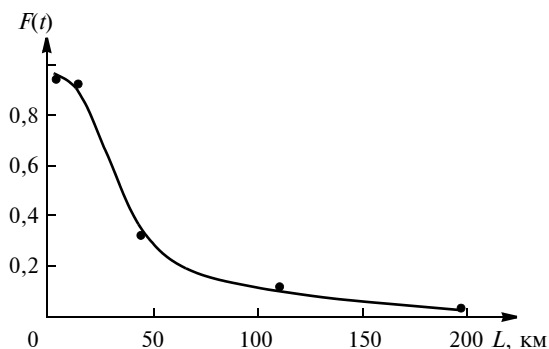


Рис. 2. Экспериментальные данные [8] (точки) и аппроксимация экспериментальной функции  $F(t)$  надежности работы грузовых радиальных шин по усталостным дефектам от пробега  $L$

трехмерных перекрывающихся микропор (микротрещин).

Данные экспериментальных испытаний на трение хорошо аппроксимируются с квазивейбулловским распределением, однако, в отличие от предыдущих, основной вклад в разрушение определяется двумерными перекрывающимися микротрещинами. Данная модель соответствует истинному механизму разрушения, так как при взаимном перемещении поверхностей трения присутствуют значительные касательные напряжения [9].

Работоспособность кинетической модели разрушения проверена аппроксимацией статистических данных по изнашиванию шин — классического композиционного материала. Хорошей аппроксимации удастся достичь в том случае, если в модель закладывается гипотетический механизм, предполагающий образование, рост и перекрывание независимо одномерных и двумерных трещин. В данном случае функция распределения накопления повреждений и функция надежности имеют вид (рис. 2):

$$F(t) = 1 - [k_5 F_1(t) + (1 - k_5) F_2(t)];$$

$$1 - F(t) = \exp\{-k_2 t^2 [1 - \exp\{-k_1 t\}]\},$$

где  $k_5$  — весовые коэффициенты, отражающие вклад в общий процесс накопления повреждений по механизмам образования, роста и перекрывания одномерных и двумерных трещин;  $F_1(t) = \exp\{-k_2 t \times [1 - \exp\{-k_1 t\}]\}$ ;  $F_2(t) = \exp\{-k_4 t^2 [1 - \exp\{-k_3 t\}]\}$  [3].

По результатам расчета кинетических констант предложена следующая интерпретация: одномерные трещины возникают как результат роста жесткости цепей эластомера, происходящего в результате механического и термического воздействий при эксплуатации шины; двумерные трещины формируются по межфазным границам эластомера — технический углерод. Это позволяет наметить пути

улучшения эксплуатационных показателей шин. Одним из таких путей может стать развитие поверхности технического углерода, второй путь — формирование менее резкой межфазной границы модификацией поверхности технического углерода. Введение компонентов, имеющих высокую адсорбционную способность к поверхности технического углерода и, в то же время, имеющих достаточно высокое сродство к полимеру, может повысить адгезию эластомера к техническому углероду. Кроме того, формирование более размытой межфазной границы должно способствовать снижению механических напряжений в этой области композиционного материала шины и, как следствие, снижению скорости образования активных ядер роста двумерных трещин [3].

Таким образом, используемый кинетический подход показал, что у обратных задач кинетики накопления повреждений в материалах, приводящих к разрушению из-за нарушения сплошности, есть определенный потенциал в решении задач по разработке новых материалов и повышению надежности изделий, характеризующихся постепенными отказами. Решения многих задач теории разрушения особенно актуальны для создаваемых волоконных композиционных материалов, так как известно, что механизмы разрушения композиционных материалов в значительной степени определяются их структурой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Богданов Дж., Козин Ф.** Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989. 344 с.
2. **Веснин Ю. И.** Вторичная структура и свойства кристаллов. Новосибирск: СО РАН, 1997. 106 с.
3. **Лукашев Е. А., Коптев Н. П., Юркин Ю. А.** Кинетические модели статистики накопления повреждений в конструкционных материалах. М.: РГУТиС, 2007. 296 с.
4. **Лукашев Е. А., Сидоров М. И.** Трибохимическая кинетика внешнего трения. М.: Эко-Пресс, 2016. 344 с.
5. **Методы трибохимических исследований** / Е. А. Лукашев, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник. Курск: Курский ГТУ, 2006. 283 с.
6. **Лукашев Е. А., Сидоров М. И.** Механохимическая кинетика накопления повреждений, разрушения и износа. М.: Эко-Пресс, 2017. 422 с.
7. **Морозов Н. Ф.** Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 256 с.
8. **Сидоров М. И.** Повышение живучести артиллерийских систем на основе моделирования и управления трибохимическими процессами изнашивания: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИММАШ РАН, 2018. 41 с.
9. **Третьяков О. Б., Гудков В. А., Тарновский В. Н.** Трение и износ шин. М.: Химия, 1992. 176 с.

## Фрактальный анализ тепловых полей при неразрушающем контроле композиционных материалов

Представлены результаты экспериментов по тепловому неразрушающему контролю композиционных материалов активным акустическим методом с мультифрактальным анализом тепловых полей. При наличии дефектов фрактальные характеристики теплового поля меняются в сторону увеличения. Топологические показатели теплового поля отражают структурные особенности композиционных материалов.

**Ключевые слова:** тепловой неразрушающий контроль, композиционный материал, дефект, неоднородность, структура, тепловое поле, фрактальный анализ, мультифрактальный спектр.

The results of experiments on thermal non-destructive testing of composite materials by the active acoustic method with multi-fractal analysis of thermal fields are presented. In the presence of defects, the fractal characteristics of the thermal field change in the direction of increase. Topological indicators of the thermal field reflect the structural features of composite materials.

**Keywords:** thermal non-destructive testing, composite material, defect, heterogeneity, structure, thermal field, fractal analysis, multi-fractal spectrum.

Сегодня метод теплового неразрушающего контроля (ТНК) широко используют в теплоэнергетике, строительном и промышленном производствах. К достоинствам данного контроля можно отнести универсальность, точность, оперативность, высокую производительность, возможность осуществлять его дистанционно.

При ТНК тепловая энергия распространяется в контролируемом объекте (КО), создавая температурное поле на его поверхности, которое зависит от наличия или отсутствия внутренних и наружных дефектов, отражая особенности процесса теплопередачи [1, 2].

Методы ТНК основываются на нарушениях термодинамического равновесия КО с окружающей средой, в результате чего на его поверхности возникает избыточное температурное поле, характер которого указывает на определенные особенности объекта.

Достоинства ТНК:

дистанционность;

высокая скорость обработки информации;

высокая производительность;  
высокое линейное разрешение;  
возможность двустороннего контроля изделия;  
контроль различных материалов;  
многопараметрические испытания;  
совместимость с другими видами неразрушающего контроля;

совместимость со стандартными системами обработки информации;

возможность поточного контроля;

возможность автоматизированного контроля.

Различают два вида ТНК — пассивный и активный. Пассивный контроль не нуждается во внешнем источнике теплоты, активный контроль предполагает нагревание КО внешними источниками [3, 4].

При пассивном ТНК предполагается, что в КО при эксплуатации или его изготовлении возникает тепловое поле. Наибольшее распространение получил пассивный ТНК. Его преимущества: контроль КО без вывода его из эксплуатации; исключает дополнительные действия по нагреванию КО. Как правило, пассивными ТНК исследуют строительные конструкции, электроприборы, контакты под напряжением. Приборы, применяемые при пассивном ТНК: тепловизор, пирометр, инфракрасный термометр, измеритель тепловых потоков, логгеры данных.

Активные методы ТНК применяют, если при эксплуатации объект не выделяет теплоты, достаточной для проведения ТК. При активном ТНК объект нагревают с помощью различных внешних источников. Данным методом контролируют композитные материалы, объекты искусства.

При активном ТНК, например при дефектоскопии, которую применяют для выявления дефектов в виде нарушений сплошности (раковин, трещин, непроклея), источниками информации являются локальные неоднородности температурного поля на поверхности ОК.

Тепловой контроль заключается в кратковременном локальном нагревании изделия и регистрации температуры в той же (при одностороннем контроле) или в противоположной зоне (при двустороннем контроле). После остывания изделия переходят к контролю в следующей точке и т. д., та-

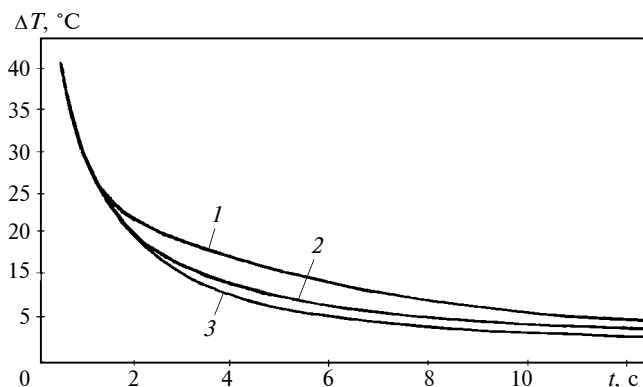


Рис. 1. Кривые охлаждения для бездефектного (2), с расслоением (1) и с увлажнением дефекта (3) участков в композиционном материале

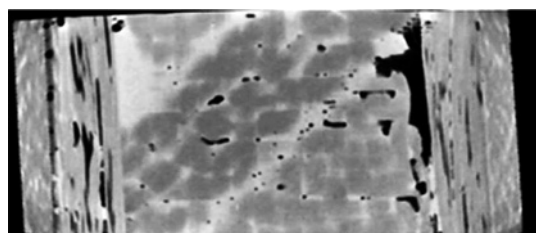


Рис. 3. Томографический срез по стенке панели [5]

ким образом, осуществляют проход по всей поверхности ОК. Температура дефектных участков будет существенно отличаться от температуры бездефектных участков.

Активный ТНК позволяет выявить дефекты внутренней структуры материала: непрочности, расслоения, трещины, ориентированные в структуре монослоя композиционного материала (КМ), т. е. в плоскости армирования.

Широко применяется визуализация тепловых полей на основании неравномерностей тепловых потоков в ОК при наличии дефектов структуры.

Перспективным методом ТНК изделий из КМ является ИК-термоскопия на основании анализа изменений температурного поля КО. При наличии таких внутренних дефектов, как расслоения монослоев, кривая изменения температурного поля будет располагаться выше кривой охлаждения бездефектного изделия. При этом для инородных включений в матрице с высокой теплоемкостью температурная кривая будет находиться ниже кривой охлаждения изделия в бездефектной зоне (рис. 1) [5].

К ТНК относится и термография — получение температурных полей в инфракрасном излучении (длина волны  $2,5 \div 2000$  мкм). Дефекты меняют скорость распространения тепловой волны. Дефекты глубокого расположения в слоистом материале менее яркие и наблюдаются с большей временной задержкой. Время от начала теплового воздействия до обнаружения температурной аномалии пропорционально квадрату глубины залегания дефекта,

поэтому продолжительность наблюдения проявления дефекта от начала температурного переходного процесса пропорциональна квадрату глубины залегания дефекта и обратно пропорциональна коэффициенту  $\alpha$  температуропроводности исследуемого материала.

Коэффициент  $\alpha$  температуропроводности определяет скорость выравнивания температур в неравновесных тепловых процессах и представляет собой отношение теплопроводности к объемной теплоемкости при постоянном давлении:  $\alpha = \chi / (\rho C_p)$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , где  $\chi$  — теплопроводность;  $C_p$  — изобарная удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность материала.

В табл. 1 представлены средние коэффициенты температуропроводности для некоторых материалов. Коэффициенты  $\alpha$  для включений и дефектов разные, что и определяет возникновение неоднородностей в тепловом поле при охлаждении.

Признаки расслоений сопоставимы с глубиной залегания и обнаруживаются при тепловом воздействии или остывании на воздухе предварительно нагретого ОК.

На рис. 2 (см. обложку) приведены термограммы охлаждения на воздухе предварительно нагретых стеклопластиковых образцов с заранее созданными структурными дефектами. Данное тепловое воздействие моделирует тепловой переходный процесс при изготовлении изделия. Толщина образцов из КМ составляет  $5 \div 10$  мм, глубина залегания дефектов  $1 \div 5$  мм [5].

Дефекты легко обнаруживаются без обработки тепловых изображений. В зоне максимального контраста разница температур составляет  $\Delta T = 4$  °C, что на порядок больше предела температурного разрешения используемой тепловизионной системы контроля.

На рис. 3 приведен термографический срез по стенке панели. Четко прослеживается неоднородность материала по толщине панели.

Для определения наиболее значимых показателей при термодиагностике КМ активным ТНК проведен эксперимент.

На рис. 4 (см. обложку) показан образец из КМ с непрочностью, который нагревали до температуры 31 °C и выдерживали при нормальной температуре. После нагревания образец имел плоское температурное поле с одинаковой температурой всей поверхности образца.

Таблица 1  
Коэффициенты температуропроводности разных материалов

Материал	$\alpha, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$
Органопластики	$1,0 \div 2,0$
Стеклопластики	$2,7 \div 5,2$
Углепластики	$4,8 \div 7,0$
Углеродистая сталь	117,2
Воздух при нормальном давлении и температуре 27 °C	221,6

На рис. 5 (см. обложку) показано температурное поле после нагревания образца и выдержки в течение 30 мин. Если в начале эксперимента тепловое поле было плоское (равномерное), то после 30 мин охлаждения при нормальной температуре поле стало неоднородным, в зоне дефекта температура выше.

Анализ гистограмм теплового поля образца после нагревания и охлаждения в течение 30 мин показал, что среднее квадратическое отклонение гистограммы при выдержке увеличилось с 0,0774 до 2,183 (относительный показатель в диапазоне освещенности пикселя от 0 до 255); ширина гистограммы увеличилась и сдвинулась в сторону меньших значений освещенности пикселей, что указывает на снижение температуры теплового поля.

Исследуем неоднородность теплового поля с помощью теории фракталов. Рассмотрим мультифрактальные спектры для полученных тепловых полей с масштабной неоднородностью [7].

Мультифракталы — неоднородные фрактальные объекты, для полного описания которых, в отличие от обычных фракталов, недостаточно введения одной величины фрактальной размерности  $D$ , т. е. необходим целый спектр таких размерностей, число которых бесконечно. Мультифрактальность процесса, как правило, характеризуется спектром сингулярности  $f(\alpha)$ : шириной спектра, асимметрией, кривизной. Увеличение ширины спектра соответствует неравномерности.

Для выявления структуры и особенностей предельного множества будем использовать множество размерностей  $D_q$  ( $q = 0, 1, 2, \dots, n$ ), характеризующих статистическую структуру, т. е. некоторую степень неоднородности множества:

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q}{\ln \varepsilon}, \quad q = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $\varepsilon$  — мерная величина покрытия ОК;  $p_i$  — мера  $i$ -го покрытия.

При  $q = 0$  это выражение имеет вид:

$$D_0 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

и дает определение фрактальной размерности; при  $q = 1$  определяется информационная размерность множества.

Мультифрактальный формализм при анализе структуры ОК показал наибольшую информативность следующих показателей, получаемых при мультифрактальной параметризации:

1)  $D_0$  — размерность Хаусдорфа—Безиковича, характеризует однородный фрактал, определяют по максимальному значению  $f(\alpha)$ , что соответствует  $D_q$  при  $q = 0$ ;

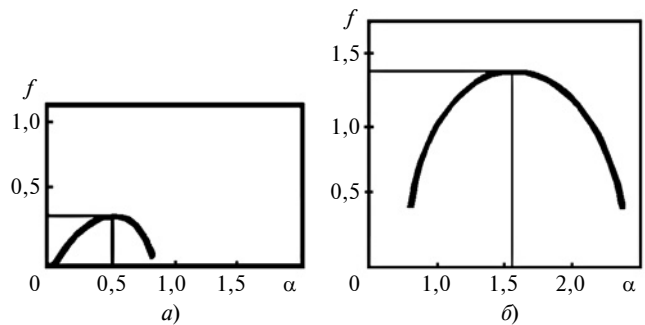


Рис. 6. Мультифрактальные спектры  $f(\alpha)$  теплового поля образца после нагревания (а) и охлаждения в течение 30 мин (б)

2)  $D_1$  — информационная размерность, характеризует скорость увеличения информации, соответствует  $D_q$  при  $q = 1$ ;

3)  $D_2$  — корреляционная размерность, характеризует вероятность обнаружения в одной и той же ячейке покрытия две точки множества, определяется значением  $D_q$  при  $q = 2$ ;

4)  $D_{+q}$  и  $D_{-q}$  — экстремальные значения фрактальной размерности, соответствующие степени разреженности мультифрактального множества. Параметр  $q$  повышает вклад ячеек с большими значениями  $\mu$  при положительных значениях  $q$  и с низкими  $\mu$  при отрицательных значениях  $q$ .

Если в качестве количественного показателя сложной геометрии фракталов используется размерность  $D_0$ , то математическое описание фрактальных мер осуществляется в терминах спектра сингулярностей  $f(\alpha)$  [7], который характеризует зависимость от  $\varepsilon$  числа  $N_\varepsilon$  элементов покрытия, соответствующих точкам с экспонентой сингулярности, равной некоторому значению  $\alpha$ :

$$N_\varepsilon(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}.$$

Величина  $f(\alpha)$  при  $\alpha = \text{const}$  соответствует размерности Хаусдорфа. В этом случае равномерного распределения меры на множестве спектр сингулярностей представляет собой единственную точку на плоскости  $\alpha f$ . При неравномерном распределении меры функция  $f(\alpha)$  имеет более сложный вид (колоколообразный). В отсутствие мультифрактальности имеем:  $D_q = D_1 = D_0 = \alpha_{\max} = \alpha_{\min} = f(\alpha)$ .

На рис. 6 представлены мультифрактальные спектры образца после нагревания и выдержки 30 мин, которые отличаются шириной спектра, асимметрией и максимальным значением; последнее отличие значительное (0,304 и 1,3371). Наименьшее значение показывает, что имеются незначительные зоны повышенной температуры наподобие канторовой пыли, т. е. образование множеств изолированных лакун, которые представляют собой мультифракталы типа канторовой пыли [8]. В случае плоского температурного поля (температура по всему телу образца имеет одно значение)

Фрактальные показатели тепловых полей разных образцов

Образец	$D$		$\beta$	
	После нагрева	После выдержки	После нагрева	После выдержки
1	2,05	2,44	2,73	2,92
2	2,02	2,44	2,71	2,93
3	2,05	2,50	2,85	2,97

мультифрактальный спектр стягивается в точку  $f(0) = 0$ .

Исследуем методом ТМК образец без дефектов с помощью температурной диагностики с теми же температурными и временными параметрами.

На рис. 7 (см. обложку) представлено трехмерное тепловое поле образца после его выдержки при нормальной температуре в течение 30 мин.

Температурное поле отражает неравномерность структуры материала. Отличия в мультифрактальных спектрах также указывают на неоднородность структуры. Максимальный мультифрактальный спектр изменяется от 0,8679 до 1,6262. И в этом случае минимальное значение указывает на то, что в поле есть зона повышенной температуры, т. е. при нагревании выявляется неоднородность структуры материала. Максимальное значение мультифрактального спектра ( $D_0 = 1,6262$ ) указывает на то, что тепловое поле имеет более "изрезанную" структуру, чем в первом образце. В этом случае проявляются внутренние структурные особенности КМ.

Таким образом, при нагревании второго образца до температуры 31 °С получили неоднородное температурное поле по сравнению с первым образцом при тех же условиях. Большое отличие мультифрактальных спектров тепловых полей образцов в нагретом состоянии показывает, что данный параметр может служить критерием неоднородности структуры КМ.

На рис. 8 представлено тепловое поле образца с неоднородной структурой в виде продольных ребер жесткости. Таким образом, активным методом ТНК можно не только выявить наличие дефекта, но и определить неоднородность структуры материала.

При однородном тепловом поле мультифрактальные спектры имеют максимальное значение  $< 1$  ( $D_0$ ), а гистограммы — минимальное среднеквадратическое отклонение.

Определим критерий для оценки наличия дефектов и структуры материала по тепловому полю. Так как рассматривали тепловое поле в мультифрактальном спектре, который отражает особенности поля, то приведем фрактальные показатели полей, определенных в трехмерном пространстве ( $2 < D < 3$ ).

В табл. 2 приведены фрактальные характеристики тепловых полей образцов, полученные методом

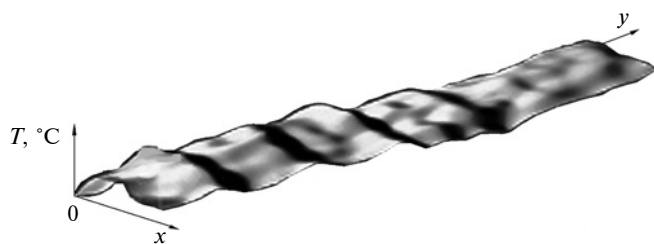


Рис. 8. Тепловое поле образца с ребрами жесткости в одном направлении

подсчета кубов ( $D$ ) и методом спектральной плотности мощности ( $\beta$ ).

Так как фрактальная размерность  $D$  определяет топологию поверхности теплового поля, то  $D = 2$  определяет плоскость, при  $D \approx 3$  имеет место значительно неравномерное тепловое поле. Показатель спектральной плотности мощности  $\beta$  (спектр мощности), который определяется линейной аппроксимацией, устанавливает характер распределения неровностей (зоны повышенной температуры) теплового поля при различных масштабах [7].

Таким образом, если после нагревания тепловое поле образцов является квазиплоским (с небольшими точечными отклонениями температур), а после выдержки поле становится неоднородным, это указывает на дефекты и наличие структурных особенностей КМ. При этом фрактальная размерность увеличивается, а мультифрактальный спектр сдвигается в сторону больших значений  $\alpha$  и  $D_0$  с увеличением ширины спектра. Фрактальные показатели можно использовать в качестве фактора, указывающего на наличие дефектов или выявляющего структурные особенности КМ при автоматизированной диагностике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **ГОСТ Р 56511—2015.** Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
2. **ГОСТ Р 56542—2015.** Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
3. **Диагностика** и мониторинг состояния сложных технических систем / Н. А. Махутов, В. Н. Пермяков, Р. С. Ахметханов и др. Тюмень: ТИУ, 2017. 632 с.
4. [http://www.sd.perm.ru/referat/2012/ref\\_09.pdf](http://www.sd.perm.ru/referat/2012/ref_09.pdf).
5. **Нестерук Д. А., Вавилов В. П.** Тепловой контроль и диагностика. Томск: ТПУ, 2007. 104 с.
6. **Ларин А. А.** Способы оценки работоспособности изделий из композиционных материалов методом компьютерной томографии / Дис. ... канд. техн. наук. М.: МНПО "Спектр", 2013. 148 с.
7. **Ахметханов Р. С.** Особенности распределений спектральной плотности мощности фрактальных и мультифрактальных процессов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 3. С. 37—43.
8. **Иванов В. В., Таланов В. М.** Моделирование квазифрактальных конфигураций межфазных границ методом итерации треугольных генераторов Коха на 2d-сетках // Успехи современного естествознания. 2012. № 11. С. 63—65.

Б. М. БАЗРОВ, д-р техн. наук (ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова),  
Т. М. ГАЙНУТДИНОВ, аспирант (МГТУ им. Н. Э. Баумана),  
e-mail: modul\_lab@mail.ru

## Факторы, влияющие на выбор технологических баз при изготовлении детали

Проанализировано влияние ряда факторов на выбор технологических баз при изготовлении детали: доступность обрабатываемых поверхностей, их параметры, размерные связи, расположение относительно действующих сил, равномерность распределения припусков.

**Ключевые слова:** деталь, заготовка, поверхность, координирующий размер, размерные связи, фактор, жесткость, припуск, сила, момент.

The influence of a number of factors on the selection of technological bases in the manufacture of the part is analyzed: the availability of the machined surfaces, their parameters, dimensional relations, location relative to the acting forces, uniformity of allowances distribution.

**Keywords:** part, workpiece, surface, coordinating dimensions, dimensional relations, factor, stiffness, allowance, force, moment.

Выбор технологических баз (ТБ) является одним из важнейших этапов разработки технологического процесса изготовления детали, во многом определяющим его эффективность, которая зависит от числа операций, разнообразия технологической оснастки, производительности обработки.

К сожалению, процесс выбора ТБ до сих пор не формализован и значительно зависит от творческого потенциала технолога. Это является главной причиной, препятствующей автоматизации проектирования единичных технологических процессов.

Сложность выбора ТБ заключается в его многофакторности. Поэтому решение этой проблемы следует начинать с установления и анализа факторов, влияющих на выбор ТБ, к которым относятся:

- доступность к изготавливаемым поверхностям детали;
- размерные связи поверхностей;
- геометрические характеристики поверхностей, принимаемых в качестве ТБ;
- расположение поверхностей относительно действующих сил;

распределение припуска на изготавливаемых поверхностях детали.

Рассмотрим влияние каждого из этих выборов на выбор ТБ.

*Доступность к изготавливаемым поверхностям детали* влияет на число ТБ, необходимых для полного изготовления детали: чем больше поверхностей детали можно изготовить от одних и тех же ТБ, тем меньше потребуется последних для изготовления детали.

Поверхности детали могут быть недоступны для изготовления по двум причинам: во-первых, из-за закрытия ряда поверхностей детали в результате установки заготовки на столе станка или в приспособлении; во-вто-

рых, из-за ограниченных возможностей станка, что не позволяет обработать на станке все доступные поверхности детали.

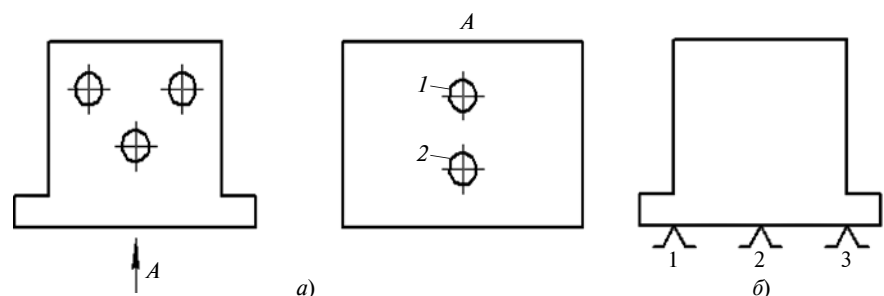
На рис. 1, а приведен эскиз детали, согласно которому отверстия 1 и 2 детали, выходящие на плоскость, которая используется в качестве установочной базы (рис. 1, б), не могут быть изготовлены.

На рис. 2 показана установка заготовки на столе вертикально-фрезерного станка, возможности которого не позволяют изготовить отверстия, расположенные на боковой поверхности детали.

*Влияние размерных связей поверхностей детали на выбор ТБ.* В данном случае под размерными связями понимаются связи между координирующими размерами поверхностей, которые характеризуются числом координирующих размеров, числом конструкторских баз (КБ), числом поверхностей, заданных от КБ, и уровнем точности координирующих размеров.

Наличие КБ показывает, какие поверхности детали следует выбирать в качестве ТБ, а число КБ определяет максимальное число ТБ.

Геометрия поверхности детали определяет число и вид координирующих размеров. Например, для определения положения плоской поверхности достаточно одного линейного и двух угловых координирующих размеров, а для определения положения ступенчатой поверхности необходимы



**Рис. 1. Влияние установки детали на возможность изготовления ее поверхностей:**  
а — эскиз детали; б — установка детали на столе станка



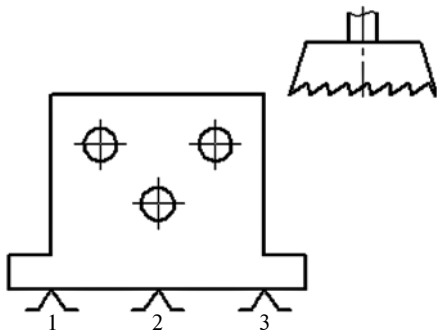


Рис. 2. Схема обработки детали на вертикально-фрезерном станке

два линейных и три угловых координирующих размера.

В свою очередь, число координирующих размеров определяет вид и число ТБ. Например, для изготовления плоской поверхности достаточно установочной базы (рис. 3, а), а для изготовления ступенчатой поверхности требуются установочная и направляющая базы — наибольшей площадью и направляющая базы — наибольшей протяженностью.

Уровень точности координирующих размеров требует при выборе ТБ применения соответствующего принципа выбора ТБ (принцип единства баз, принцип совмещения конструкторских баз с ТБ).

Как известно, принцип единства баз, когда от одних ТБ изготавливается множество поверхностей с разными конструкторскими базами, отличается высокой эффективностью. Но его недостатком является ужесточение допусков на операционные размеры изготавливаемых поверхностей, у которых ТБ не совпадает с их КБ, в результате чего возникают трехзвенные технологические размерные цепи.

При повышении уровня точности координирующих размеров наступает момент, когда выигрыш от применения принципа единства баз становится меньше потерь из-за уменьшения допусков на операционные размеры. В этом случае применяется принцип совмещения баз.

Например, на рис. 4, а показана схема базирования детали при заданных допусках 0,1 мм на координирующие размеры осей

отверстий 1 и 2 (изготовление от разных баз). Если изготавливать их от одной базы (рис. 4, б), то допуски на их координирующие размеры будут равны 0,05 мм.

*Влияние геометрических характеристик поверхностей детали на выбор ТБ.* Такими характеристиками являются площадь и протяженность поверхности.

Согласно правилам базирования [1, 2] к базам предъявляются следующие требования: установочная база должна отличаться наибольшей площадью, а направляющая и двойная направляющая базы — наибольшей протяженностью.

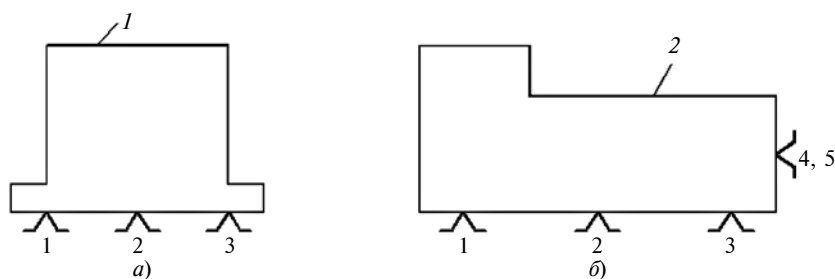


Рис. 3. Схемы базирования детали:

а — при изготовлении плоской поверхности 1 (1, 2, 3 — установочная база); б — при изготовлении ступенчатой поверхности 2 (1, 2, 3 — установочная база; 4, 5 — направляющая база)

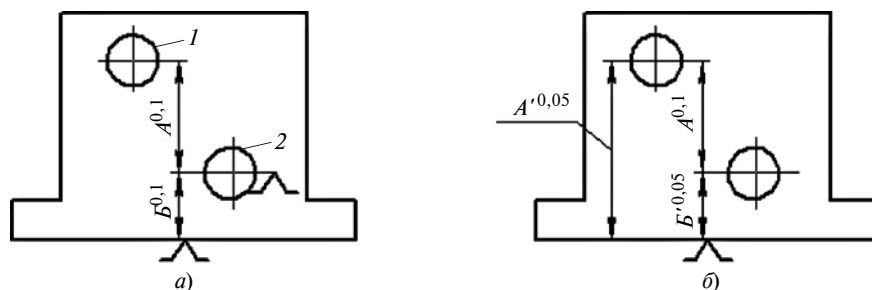


Рис. 4. Схемы достижения точности координирующих размеров отверстий 1 и 2 от разных баз (а) и от одной базы (б)

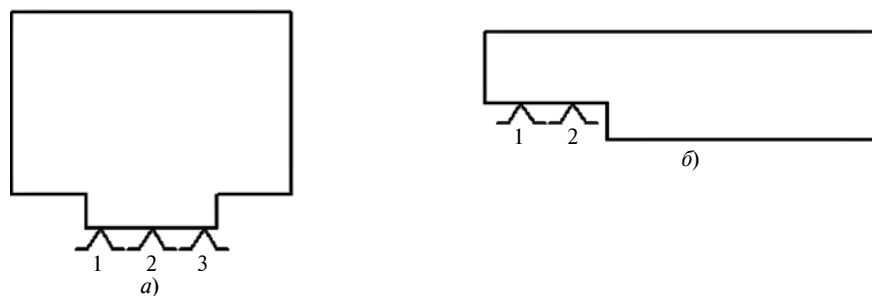


Рис. 5. Влияние характеристик поверхностей детали на качество ее базирования:

а — базирование установочной базой 1, 2, 3; б — базирование направляющей базой 1, 2

При таком расположении установочной базы образуется консоль, в результате чего под действием веса каретки возникает опрокидывающий момент.

Консоль снижает жесткость конструкции, что способствует появлению при обработке вибрации, а наличие опрокидывающего момента требует увеличения силы зажима в приспособлении.

*Влияние на выбор ТБ распределения припуска по изготавливаемым поверхностям детали.* Эта задача решается при выборе ТБ на первой операции: их выбор определяет распределение припуска по всем поверхностям детали. При этом желательно обеспечить равномерное распределение припуска на всех поверхностях детали. Однако такое решение за-

дачи теоретически невозможно. С одной стороны, чтобы распределить равномерно припуски на какой-либо поверхности, ее надо выбрать в качестве базы на первой операции. С другой стороны, чтобы лишить заготовку всех степеней свободы, требуется не более трех поверхностей, на которых располагаются шесть опорных точек [2]. Следовательно, оставшиеся поверхности не могут использоваться в качестве ТБ на первой операции и потому на них не удастся обеспечить равномерное распределение припуска.

Следует также отметить, что не на всех трех поверхностях, принимаемых в качестве ТБ, припуск будет равномерным.

Рассмотрим следующий пример. Пусть корпусная деталь имеет три отверстия 1, 2, 3, к геометрической точности которых предъявляются высокие требования (рис. 7), в связи с чем желательно обеспечить равномерный припуск на этих поверхностях.

Приняв, например, отверстие 1 за двойную направляющую базу, заготовку лишают четырех степеней свободы. У заготовки остаются две степени свободы — вращение вокруг оси отверстия 1 и поступательное движение вдоль оси отверстия 1.

Для лишения заготовки возможности вращения вокруг оси отверстия 1 можно использовать поверхность отверстия 2; тогда отверстие 3 не может быть базой.

В результате приведенная схема базирования обеспечивает равномерный припуск в отверстии 1 (без учета погрешности формы отверстия в заготовке), а в отверстии 2 равномерное распределение припусков будет достигнуто только в продольном сечении, где располагается опорная точка 5.

В связи с изложенным в качестве баз на первой операции следует выбирать те поверхности, к качеству которых предъявляются высокие требования. Например, как показано на рис. 8, базировать станину станка на первой

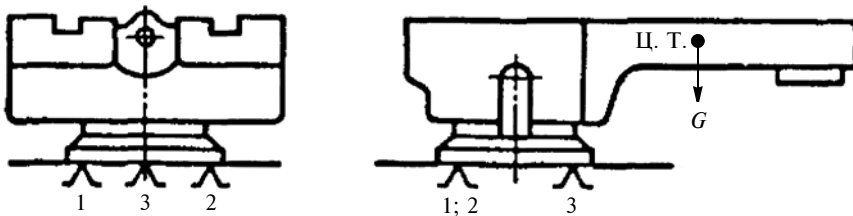


Рис. 6. Базирование каретки револьверного суппорта станка плоскостью (1, 2, 3 — установочная база)

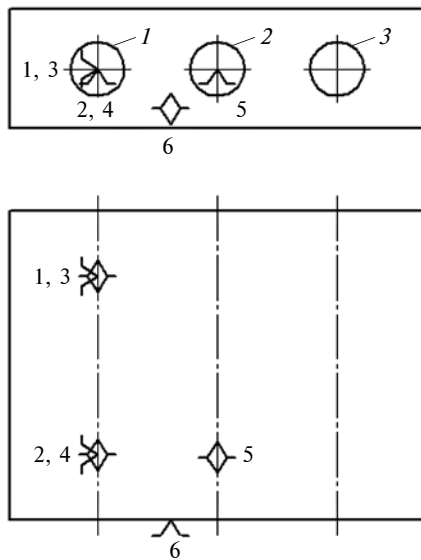


Рис. 7. Схема базирования корпусной детали на первой операции: 1, 2, 3, 4 — двойная направляющая база; 5, 6 — опорные базы

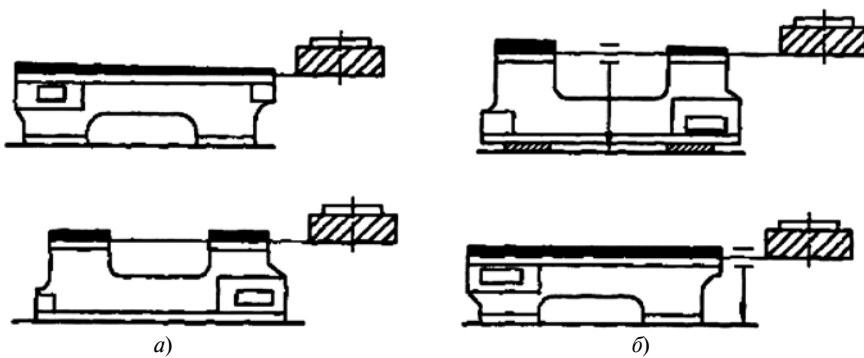


Рис. 8. Базирование ножками (а) и направляющими (б) станины токарного станка на первой операции

## Водородная деградация материалов при термообработке заготовок из сталей и титановых сплавов

Показана взаимосвязь двух областей водородного материаловедения: водородной деградации материалов и их водородной обработки. Атомарный водород при обработке стальных заготовок инициирует разветвленную цепную химическую реакцию горения и взрыва горючей смеси с образованием флокенов, а при обработке титановых заготовок — промежуточное фазовое превращение с аномальным ростом зерен сплава и образованием мартенситной микроструктуры.

**Ключевые слова:** водородное материаловедение, обработка материалов, водородная хрупкость, атомарный водород, флокены, разветвленная цепная реакция, фазовое превращение.

The interrelation of two areas of hydrogen materials science is shown: hydrogen degradation of materials and their hydrogen treatment. During the processing of steel billets, atomic hydrogen initiates a branched chain chemical reaction of combustion and explosion of a combustible mixture with the formation of snowflakes, and during the processing of titanium billets — an intermediate phase transformation with an abnormal growth of alloy grains and the formation of a martensitic microstructure.

**Keywords:** hydrogen materials science, materials processing, hydrogen embrittlement, atomic hydrogen, snowflakes, branched chain reaction, phase transformation.

При эксплуатации деталей из сталей и сплавов неизбежно возникают проблемы водородной хрупкости, водородной коррозии, флокенов и, в целом, водородной деградации материалов. При этом сле-

дует учитывать, что водород всегда присутствует в металле в виде неконтролируемой производственной примеси или проникает в металл из внешней среды. Эти "водородные осложнения" продолжают ставить перед учеными и инженерами решения неотложных задач. Однако, несмотря на общее мнение исследователей, что причины водородной деградации материалов связаны с наличием в них водорода, вопросы теории флокенообразования и водородной хрупкости металлов до настоящего времени остаются открытыми.

Современное водородное материаловедение состоит из двух самостоятельных, но взаимосвязанных научно-технических областей [1]: одна область — исследование и решение научных и технических проблем, связанных с водородной деградацией материалов, относится к традиционным проблемам материаловедения [2]; другая область — водородная обработка материалов (ВОМ) — является результатом открытий новых физических явлений. Эти открытия показали, что при насыщении металла водородом материал переходит в неравновесное состояние, а при возвращении к равновесному состоянию происходит глубокая перестройка структуры материала на электронном, атомно-кристаллическом и фазовом уровнях. Экспериментально установлены: диффузионно-кооперативные превращения; высокотемпературные диффузионные фазовые превращения; промежуточные фазовые и структурные превращения, а также атомное упорядочение, атомная сегрегация и аморфизация материала [3].



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 48)

операции желательно направляющими станины, что обеспечит на них равномерное распределение припуска и, как следствие, равномерное качество поверхностного слоя направляющих станины.

Геометрия поверхности детали тоже предъявляет свои требования к равномерному распределению припусков. В первую очередь следует обеспечивать равномерный припуск на охватывающих поверхностях, так как при их обработке, как правило, применяется консольный инструмент,

для которого характерна низкая жесткость. Это приводит к большим погрешностям обработки и понижает ее производительность из-за увеличения числа рабочих ходов и снижения режима обработки.

В заключение следует отметить, что в соответствии с изложенным выбор ТБ отличается многофакторностью и многообразием их влияния на выбор КБ. Понимание этого влияния позволит по-новому подойти к разработке метода выбора ТБ при

проектировании технологических процессов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Базров Б. М.** Основы машиностроения: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 736 с.
2. **Базров Б. М.** Теория и практика базирования в машиностроении // Вестник машиностроения. 2017. № 4. С. 5—10.
3. **Балакшин Б. С.** Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1969. 560 с.

Однако несмотря на многолетние исследования в указанных выше областях материаловедения, по-прежнему существуют как мнение П. В. Склюева [4], что "без общепризнанной теории борьба с флокенами до настоящего времени идет вслепую, методами, известными еще полвека назад, ... а сам этот дефект уже более 100 лет — наиболее опасный и загадочный дефект стали", так и мнения сотрудников Университета Макгилла (Канада) и Федерального политехнического института Лозанны (Швейцария), что "со времени открытия в 1875 г. водородная хрупкость остается серьезной головной болью при разработке конструкционных материалов для самых разных отраслей промышленности, от постройки боевых кораблей до самолетов и ядерных реакторов. Несмотря на десятилетия исследований, специалисты до сих пор не до конца понимают физические процессы, лежащие в основе явления, и уж тем более не могут построить строгую модель, способную предсказать, где, когда и как водородная хрупкость материала даст о себе знать. В итоге, как и встарь, ученые, занятые новыми материалами, вынуждены полагаться на метод проб и ошибок". Это подтверждают исследования Б. А. Колачева [2], который заявил о шести видах водородной хрупкости титана и его сплавов.

В свете вышесказанного рассмотрим проблемы флокенообразования в сталях и водородной хрупкости титановых сплавов во взаимосвязи этих двух областей водородного материаловедения, но основываясь не на очередной физической модели водородной хрупкости, а на элементарной теории цепных разветвленных реакций горения — окисления водорода при его внутренней диффузии в заготовке.

Проведенный автором анализ и собственные исследования в области теории и практики производства крупных поковок позволили установить, что ни одна из существующих гипотез флокенообразования, подчеркивая первостепенное значение атомарного водорода в образовании трещин, не рассматривает его химической активности.

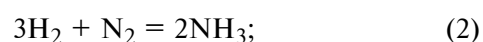
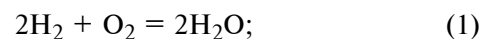
Как отмечалось, водород в стальной заготовке (слитке) всегда присутствует в виде производственной примеси, например, ввиду термической устойчивости до температуры 2000 °С, в микрополостях, оксидах и сульфидах в основном в молекулярной форме (H<sub>2</sub>) и в меньшей степени как хемосорбированный сталью при кристаллизации — в атомарном состоянии (H).

Однако если принять во внимание достаточно полный состав химических элементов — реагентов химических реакций, то он будет следующим:

водород, кислород и азот в атомарном (в твердом растворе) и молекулярном (в пустотах) состояниях, т. е. в виде H, H<sub>2</sub>; O, O<sub>2</sub>; N, N<sub>2</sub>;

железо, марганец, алюминий и титан в виде атомов Fe и ионов Fe<sup>+2</sup>, Mn<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, Ti<sup>+3</sup> (в оксидах, сульфидах и нитридах) и сера (S<sup>-2</sup>).

С учетом того, что в рассматриваемом случае (охлаждение стальной заготовки с температур аустенитизации послековки—прокатки и термообработки) идут процессы интенсивной диффузии и выравнивания концентраций газов в объеме стали, нельзя отрицать возможность следующих химических реакций:



Только реакция (3) является мономолекулярной и идет в полном соответствии с химическим уравнением и образованием конечного вещества — сероводорода, который в крупном слитке (заготовке) образуется в местах зональной ликвиции серы (центральной V-образной и внецентренной Λ-образной), т. е. можно говорить о неизбежном присутствии сероводорода в заготовке. Эта реакция проходит медленно и не сопровождается каким-либо предельным или критическим явлением. Реакция (1) с кислородом является тримолекулярной, а реакция (2) с азотом — четырехмолекулярной, что доказывает невозможность их прохождения в одну стадию. Реакции (1) и (2) являются сложными и относятся к цепным.

В цепных химических реакциях исходные вещества превращаются в продукты реакции в результате регулярного последовательного чередования нескольких реакций, идущих с сохранением свободной валентности с участием активных частиц. Центрами этих реакций могут быть активные частицы — свободные атомы, ионы, радикалы и возбужденные молекулы.

Любая цепная реакция обязательно включает три основные стадии: зарождение, продолжение и обрыв цепи:

зарождение (инициирование) цепи — стадия, на которой образуются свободные радикалы из валентно-насыщенных молекул исходных веществ;

продолжение цепи — стадия реакций, идущих с сохранением свободной валентности и приводящих к расходованию исходных веществ и образованию продуктов реакции;

обрыв цепи — стадия, приводящая к исчезновению свободной валентности.

Элементарная стадия, на которой превращение активных промежуточных частиц приводит к увеличению числа свободных радикалов и атомов, называется разветвлением цепей [5]. Существуют два типа цепных реакций: разветвленные и не разветвленные.

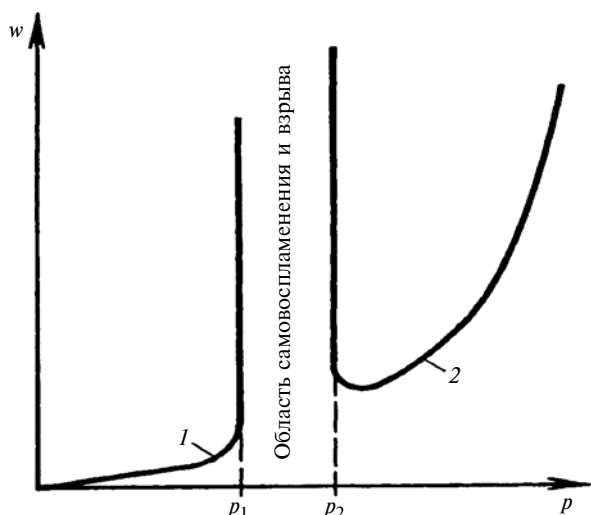


Рис. 1. Зависимости изменения скорости  $w$  разветвления (1) и затухания (2) от давления  $p$  для цепной разветвленной химической реакции:

$p_1$  и  $p_2$  — нижний и верхний пределы давления воспламенения—взрыва

Реакции окисления водорода молекулярными кислородом и азотом относятся к разветвленным цепным химическим процессам, активным центром которых является атом водорода.

Применительно к охлаждению стальной заготовки с температур аустенитизации цепная реакция окисления водорода азотом маловероятна. Поэтому основной химической реакцией окисления — горения водорода, является его окисление кислородом, присутствующим в металле как в свободном состоянии ( $O$ ,  $O_2$ ), так и в виде оксидов и сульфидов металлов с переменной валентностью —  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $FeS$ ,  $MnS$ .

Теория цепных разветвленных реакций разработана Н. Н. Семеновым [6]. В настоящее время механизм горения (окисления) водорода исследован наиболее полно. Характерной особенностью только цепных разветвленных реакций является существование нижнего и верхнего пределов давления воспламенения—взрыва (рис. 1).

Скорость цепной разветвленной реакции определяется по формуле

$$\omega = \frac{m_0}{\beta - \delta} \left( 1 - e^{-\frac{\beta - \delta}{\tau} t} \right). \quad (4)$$

где  $m_0$  — число активных частиц, возникающих в единицу времени в единице объема под внешним воздействием;  $\beta$  — вероятность обрыва цепи;  $\delta$  — вероятность разветвления цепей;  $\tau$  — время между двумя последовательными стадиями;  $t$  — время реакции.

При этом, если  $0 < \delta > \beta$ , то  $\delta - \beta > 0$ .

Приведем уравнение (4) к виду:

$$\omega = \frac{m_0}{\delta - \beta} \left( e^{\frac{\delta - \beta}{\tau} t} - 1 \right).$$

При  $t \rightarrow \infty$  скорость реакции неограниченно увеличивается по экспоненциальному закону и заканчивается взрывом при постоянной температуре. В результате тихая реакция может вдруг перейти в автоускоряющуюся не вследствие выделения теплоты, а вследствие разветвления цепей. В этом случае теплота будет следствием, а не причиной взрыва.

Если цепная реакция в горючей смеси протекает ниже нижнего предела давления, то цепи не развиваются из-за их обрыва на стенках сосуда. Поэтому нижний предел воспламенения в значительной степени зависит от состава смеси, диаметра сосуда и материала стенок и мало зависит от температуры. С повышением давления обрыв цепей затрудняется, они сильно разветвляются, реакция самоускоряется и заканчивается самовоспламенением и взрывом. При достижении верхнего предела воспламенения разветвление цепей снова затрудняется из-за их обрыва в объеме в результате тройных столкновений с частицами загрязнений, концентрация которых увеличивается с повышением давления. Верхний предел воспламенения зависит от температуры, природы и количества примесей и мало зависит от формы сосуда, его диаметра и состояния стенок.

Таким образом, возникновение цепного воспламенения или взрыва объясняется лавинообразным нарастанием числа активных частиц (свободных радикалов) при постоянной температуре в результате протекания разветвленной цепной реакции.

Переходя к рассмотрению процесса флокенообразования, примем во внимание следующие результаты исследований:

в крупных поковках флокены располагаются на  $1/2$  радиуса сечения и совпадают, как правило, с одной внецентренной ликвации слитка;

водород скапливается в самих включениях оксидов ( $FeO$ ,  $MnO$ ) и сульфидов ( $MnS$ ,  $FeS$ ) (рис. 2) и около них;

растворимость водорода в аустените в 2 раза выше, чем в феррите при температуре превращения; флокены образуются при температуре ниже  $200^\circ C$ ;

давление водорода, выделяющегося при ( $\gamma \rightarrow \alpha$ )-превращении, недостаточно для разрушения стали;

в большинстве случаев водород удаляют только с поверхности поковки; в центре его концентрация остается высокой (рис. 3). Полная диффузия водорода из поковки невозможна;

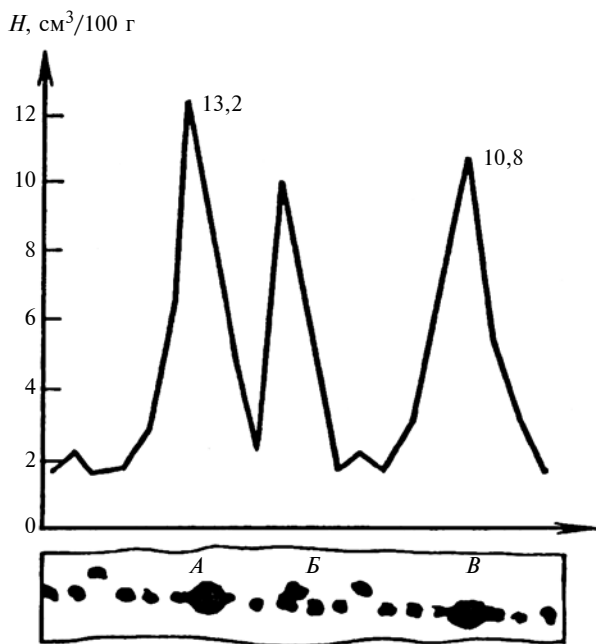


Рис. 2. Распределение десорбированного и молизванного водорода  $H$ , локализованного около крупных сульфидных включений  $MnS$  и  $FeS$  (A, B, B)

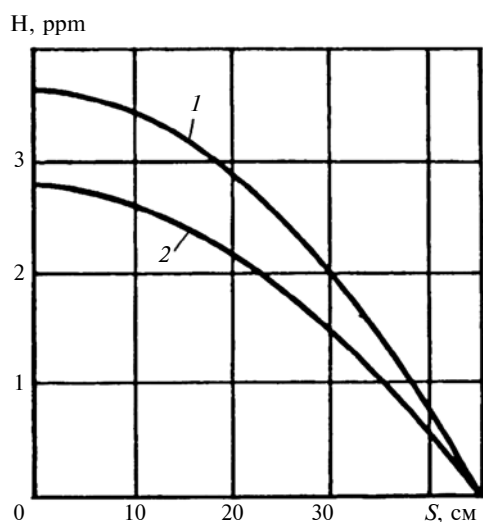


Рис. 3. Градиент концентрации водорода  $H$  в цилиндрической заготовке  $\varnothing 95$  см после 200 (1) и 400 ч (2) выдержки при коэффициенте диффузии  $D = 1,15 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с ( $S$  — расстояние от центра заготовки)

число водородных трещин увеличивается в направлении от поверхности к центру (в основном в верхней части слитка и на расстоянии 50÷80 % радиуса от поверхности);

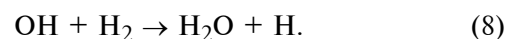
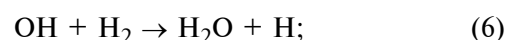
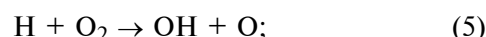
очень чистые по оксидам и сульфидам стали могут иметь флокены при меньшем содержании водорода, чем стали нормальной чистоты;

при неправильной термической обработке даже у сверхчистых сталей тенденция образования флокенов увеличивается.

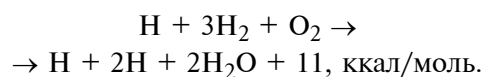
С учетом основных положений теории горения и взрыва можно заключить, что причиной образования флокенов в стали являются локальные цепные взрывы, возникающие при химической реакции горения (окисления) водорода и сероводорода. При этом первая реакция имеет место в ликвационных зонах с преобладанием оксидов ( $FeO$ ,  $MnO$ ), а вторая — в зонах сульфидов ( $MnS$ ,  $FeS$ ).

Последнее утверждение объясняется тем, что белые "хлопья", обнаруживаемые в изломах образцов с флокенами, являются участками восстановления железа и марганца из их окислов и сульфидов активными частицами разветвленной цепной реакции ( $H$ ,  $OH$ ) в момент гибели на "стенках" ликвационных зон.

Цепная разветвленная реакция окисления (горения) водорода развивается по следующей схеме:



При этом грунто-реакция цикла имеет вид:

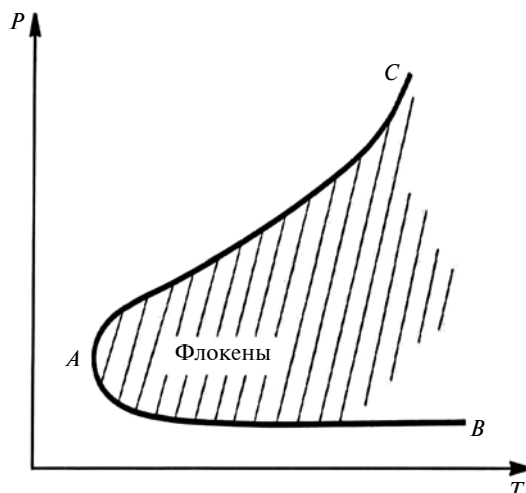


В результате этой реакции в случае образования только воды выделяющаяся энергия должна была бы составлять 114 ккал/моль, т. е. основная часть энергии (103 ккал/моль) идет на диссоциацию молекул водорода. Поэтому образуется колоссальное количество свободных атомов водорода, а также кислорода и радикалов  $OH$ , в миллиарды раз превышающее их равновесные концентрации, что приводит к цепному взрыву.

Цепные процессы горения являются диффузионными, так как в пространстве они распространяются путем диффузионной передачи активных частиц [7]. В стальной заготовке при охлаждении дополнительное повышение концентрации атомарного водорода ( $H$ ) во включениях происходит в момент ( $\gamma \rightarrow \alpha$ )-превращения в матрице, а при локальном первичном взрыве активные частицы цепной реакции диффундируют к другим областям.

Таким образом, причиной образования флокенов является цепное горение и взрыв при разветвленной химической реакции окисления водорода (рис. 4).

Очагами зарождения цепных реакций являются включения оксидов и сульфидов, в которых сосредоточены реагенты химических реакций ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2S$ ,  $FeO$ ,  $FeS$ ,  $MnO$ ,  $MnS$ ). Основным активным центром реакции является атомарный водород, растворенный в твердом растворе стали и "бомбардирующий" окисью сульфиды при диффузии

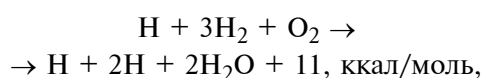


**Рис. 4. Полуостров *СAB* воспламенения и взрыва горючих смесей:**  
*AB* и *AC* — нижний и верхний пределы давления самовоспламенения

и ( $\gamma \rightarrow \alpha$ )-превращении, повышая скорость цепной разветвленной химической реакции. Первичный взрыв происходит при достижении активными частицами ( $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $SO$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ) нижнего предела давления в одном из начальных объемов включений.

Единой теорией флокенообразования является теория горения и взрыва Н. Н. Семенова при разветвленных химических реакциях.

Следовательно, противоблокенная термическая обработка должна либо подавлять диффузию в объеме поковки (закалка), либо включать такое ступенчатое охлаждение заготовки от температуры окончанияковки—прокатки, чтобы после температуры ниже  $A\gamma 3$  (температура превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  при охлаждении) обязательно следовала выдержка до выравнивания по всему сечению заготовки при температуре  $600 + 20$  °С. Так как цепная реакция



приводящая к образованию флокенов, при этих температурах проходит мгновенно и без взрыва (при 618 °С за 7 с) [8].

Техническими условиями ВИАМ [9] установлены жесткие требования по максимально допустимому содержанию водорода в изделиях авиационной техники. Однако в зависимости от состава сплава указанное содержание колеблется в пределах  $0,005 \div 0,015$  %  $H_2$ . Такое существенное различие в требованиях по содержанию водорода объясняется тем, что до настоящего времени причина водородной хрупкости не только титановых, но и других металлических материалов так и не выяснена. Это подтверждают и результаты исследований автора, по которым в поковках колец из сплава ВТ20 обнаружена водородная хрупкость с содержанием водорода в сплаве менее 0,009 % (при допуском по ТУ — 0,015 %).

Склонность сплава ВТ20 к водородной хрупкости была установлена при двойном отжиге поковок колец по режимам: 1) нагрев до 750 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе; 2) нагрев до 750 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + нагрев до 600 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. Исследование механических свойств сплава показало существенное снижение всех его характеристик после двойного отжига (таблица). Макро- и микроструктурными анализами половинок разрывных образцов (рис. 5) установлено, что водородная хрупкость сплава ВТ20 связана с аномальным ростом зерна при температуре отжига  $600 \div 650$  °С, т. е. с прохождением "собирательной рекристаллизации" в титановом жаропрочном сплаве при температурах значительно ниже фактической  $980 \div 1020$  °С [2].

Так как в заготовке из титановых сплавов кроме водорода присутствует кислород, то образование  $H_2O$  возможно в результате диффузии водорода в объеме заготовки при нагревании и его соединении с кислородом по экзотермической цепной реакции (4)—(7), после завершения которой "атомы водорода рекомбинируют в объеме и на стенке, выделяя тепло, затраченное на их образование. Как отме-

**Механические свойства колец ГТД из сплава ВТ20**

Термообработка	Образец	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
Отжиг по режиму 1: 750 °С	1	1081	1133	18,6	48,5
	3	1062	1113	10,5	43,7
Отжиг по режиму 2: 750 °С + 600 °С	2	983,3	1081	6,1	18,6
	4	1039	1128	8,4	14,9
ОСТ 1 90043—72 (кольцо цельнокатаное)	—	Нет требований по ОСТ	Не менее 950	Не менее 8	Не менее 20

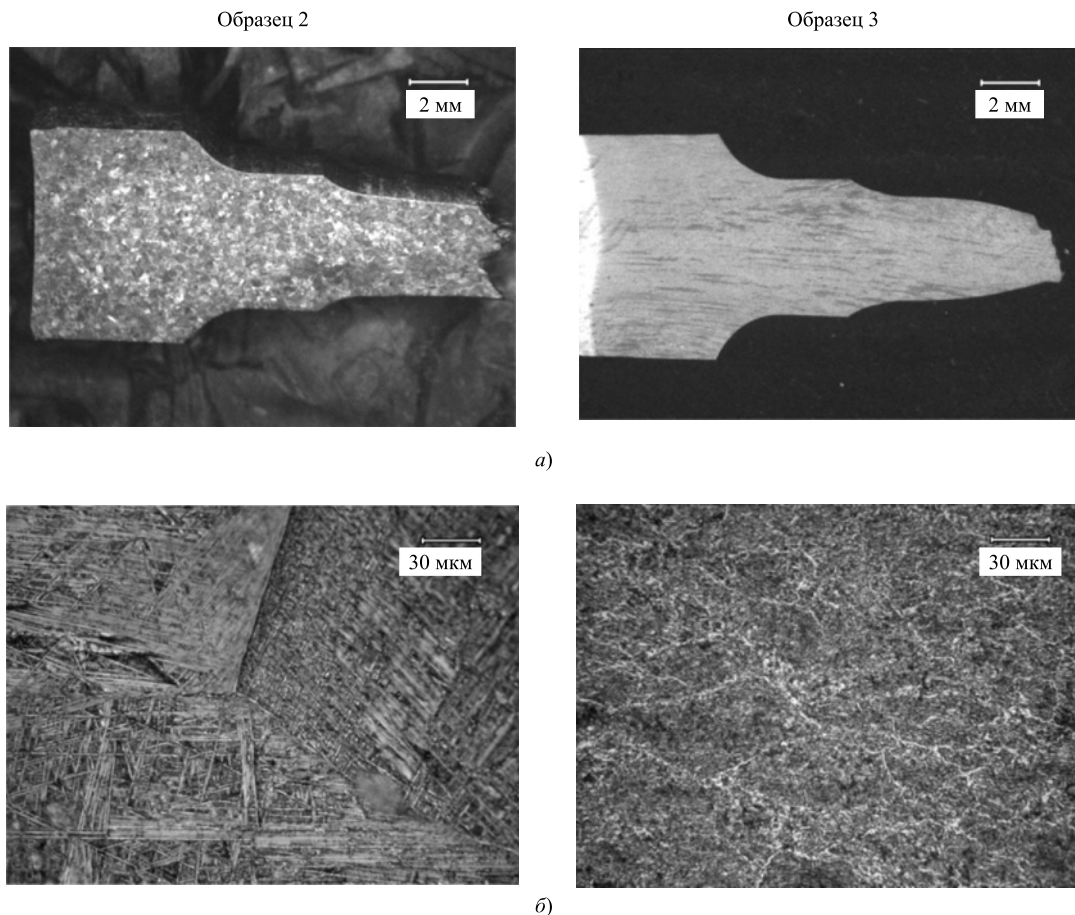


Рис. 5. Образцы 2 и 3 соответственно с крупнозернистой и мелкозернистой макроструктурой (а,  $\times 50$ ) и микроструктурой (б,  $\times 500$ )

чалось ранее, в интервале температур  $600 \div 650$  °С реакция окисления водорода проходит без взрыва. При этом, вероятно, теплота данной химической реакции становится выше теплоотдачи, что и приводит к значительному локальному повышению температуры в образце и аномальному росту зерна сплава. При этом рекомбинация атомов водорода с выделением тепла происходит "в объеме и стенках границ зерен".

Кроме того, на микроструктуре (см. рис. 5, б) прослеживается "зубчатость" (неравновесность) границ зерен, указывающая на инициирование водородом фазового наклепа [10], вызывающего при последующем нагреве до  $600 \div 650$  °С аномальный рост зерна сплава.

Таким образом, адсорбированный сталью атомарный водород при термообработке стальных заготовок инициирует прохождение разветвленной цепной химической реакции горения со взрывом горючей смеси и образованием флокенов. Адсорбированный титаном атомарный водород при термообработке титановых заготовок инициирует в них промежуточные фазовые превращения с аномальным ростом зерна и образованием мартенситной микроструктуры, приводящие к водородной хрупкости сплава.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гольцов В. А. Индуцированные водородом фазовые превращения и водородная обработка материалов // Структура и свойства материалов. Донецкий национальный технический университет. Донецк: ДНТУ, 2014. С. 193—201.
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
3. Гольцов В. А. Явления, обусловленные водородом и индуцированными им фазовыми превращениями // Взаимодействие водорода с металлами; Отв. ред. А. П. Захаров. М.: Наука, 1987. С. 264—292.
4. Склюев П. В. Водород и флокены в крупных поковках. М.: Машгиз, 1963. 188 с.
5. Эммануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974. С. 287—338.
6. Семенов Н. Н. Цепные реакции. М.: Наука, 1986. 535 с.
7. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 345 с.
8. Онищенко А. К. Флокены — результат локальных цепных взрывов при разветвленной химической реакции окисления (горения) водорода // Вестник машиностроения. 2007. № 3. С. 58—62.
9. Авиационные материалы. Т. 5. Магниево-титановые сплавы. М.: ВИАМ—ОНТИ, 1973. 583 с.
10. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. М.: Металлургия, 1973. 205 с.



## Портативный станочный модуль с лазерной системой базирования для обработки изношенных клиновых пазов рамы тележки подвижного состава

Рассматривается обработка изношенных клиновых пазов деформированной крупногабаритной рамы тележки подвижного состава с помощью портативного станочного модуля, базирующегося на раме тележки по лазерному пучку.

**Ключевые слова:** подвижной состав, рама тележки, клиновой паз, портативный станочный модуль, лазерная измерительная система.

The processing of worn wedge grooves of a deformed large-sized frame of a rolling stock trolley using a portable machine module based on a trolley frame along a laser beam is considered.

**Keywords:** rolling stock, trolley frame, wedge groove, portable machine module, laser measuring system.

В процессе эксплуатации подвижного состава происходит износ поверхностей клиновых пазов и деформация рам тележек подвижного состава, от которых зависит работоспособность и надежность колесных пар.

Требуемая точность крупногабаритных рам связана с необходимостью измерения геометрических параметров [1] при восстановлении и последующей механической обработке клиновых пазов в рамках в условиях депо, т. е. вне заводского производства. Поэтому обработка восстанавливаемых поверхностей клиновых пазов рам тележек затруднена, а в ряде случаев невозможна из-за отсутствия в депо крупногабаритных продольно-фрезерных или горизонтально-расточных станков ввиду их нерентабельности. В этом случае используют портативные станочные модули с базированием на обрабатываемой детали по лазерному пучку, которые обеспечивают точную и менее дорогую обработку крупногабаритных изделий в условиях ремонта в депо. Изучение этого является предметом данной статьи.

Восстановительный капитальный ремонт крупногабаритных рам тележек особенно актуален вне заводского производства, например в депо.

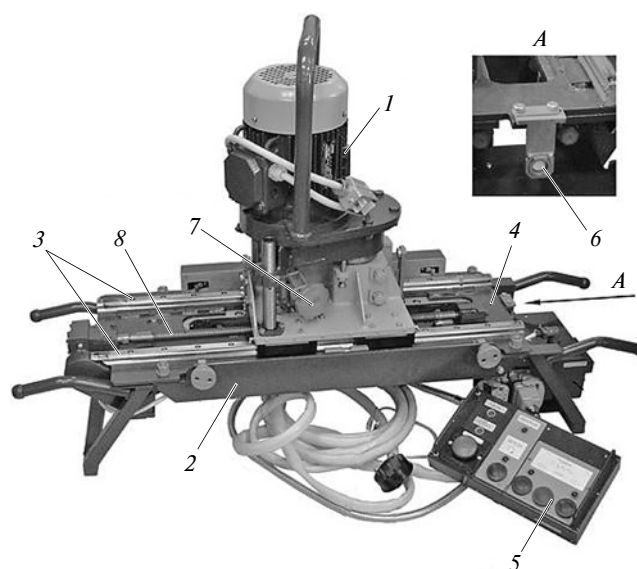
В работе рассматривается портативный станочный модуль с базированием на раме тележки длиной 6500 мм с помощью оптоэлектронной системы, в частности с базированием по лазерному пучку.

Учитывая большие приведенные затраты на обработку крупногабаритных изделий на стационарных агрегатных станках в условиях депо, их обработку целесообразно выполнять портативным станочным модулем, приведенным на рис. 1. Модуль

предназначен для фрезерования и упрочнения наплавленных поверхностей клиновых пазов поводковых кронштейнов рам тележек тягового подвижного состава профильной наборной фрезой при капитальном восстановительном ремонте в депо.

Базирование модуля на раме тележки по лазерному пучку осуществляется лазерной системой ЛИС-РТ-3 [2], с помощью которой определяются размеры и отклонения поверхностей клиновых пазов от соосного номинального расположения. Базирование станочного модуля по лазерным пучкам обеспечивает необходимое положение оси вновь формируемого клинового паза в глобальной системе координат рамы тележки.

Станочный модуль МФ-024 (см. рис. 1) при обработке рам тележек электровозов размещается на поводковом кронштейне обрабатываемой рамы и базируется по лазерному пучку излучателя при помощи нескольких целевых знаков 6, расположенных на основании 2 и подвижной платформе шпиндельного узла. Боковые наплавленные поверхности клиновых пазов фрезеруются за несколько проходов. После обработки одного кронштейна модуль перемещают на следующий кронштейн рамы, на котором требуется фрезерование клиновых пазов, и цикл фрезерования повторяют.



**Рис. 1. Станочный модуль МФ-024:**

1 — фрезерная головка; 2 — основание; 3 — направляющие; 4 — платформа; 5 — пульт управления; 6 — целевой знак платформы; 7 — домкрат; 8 — ходовой винт

### Число и глубина проходов фрезерования

Толщина наплавки $t$ , мм	Число $N$ проходов	Площадь фрезерования за один проход, мм <sup>2</sup>	Глубина фрезерования за проход, мм					
			$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
0÷2,5	2	118	38	47	—	—	—	—
2,5÷3,5	3	110	30	40	47	—	—	—
3,5÷5,0	4	118	22,5	33	41	47	—	—
5,0÷6,5	5	122	17	27	35	41,5	47	—
6,5÷8,0	6	126	13,5	22,5	30	36,5	42,5	47

Наплавка изношенного клинового паза сварным электродом (рис. 2, а) осуществляется по результатам лазерных измерений, приведенных в карте геометрических размеров дефектовочной ведомости измеренной рамы тележки. На клиновом пазе с симметричным износом (смещение оси паза менее 0,2 мм) наплавляются обе поверхности, причем каждая поверхность наплавляется за один проход слоем 2÷4 мм, но не менее величины износа. Раковины при наплавке не допускаются. На клиновом пазе со смещением оси более 0,2 мм наплавляется только та поверхность, в сторону которой произошло смещение оси. Вторую поверхность паза рекомендуется не наплавлять (если это не обусловлено его износом). Оплавленные кромки паза восстанавливаются дополнительной наплавкой.

Станочный модуль базируется посредством лазерной информационной системы, которая ориентирует модуль по оси клиновых пазов с помощью лазерного пучка. Для этого устройство поворота устанавливает лазерный пучок на высоту нижнего целевого знака каретки модуля. Каретку устанавливают на наибольшем расстоянии от целевого знака платформы модуля. Лазерный пучок должен совпадать с вертикальной риской целевого знака. Горизонтальное положение модуля на кронштейне рамы тележки определяется по встроенному уровню.

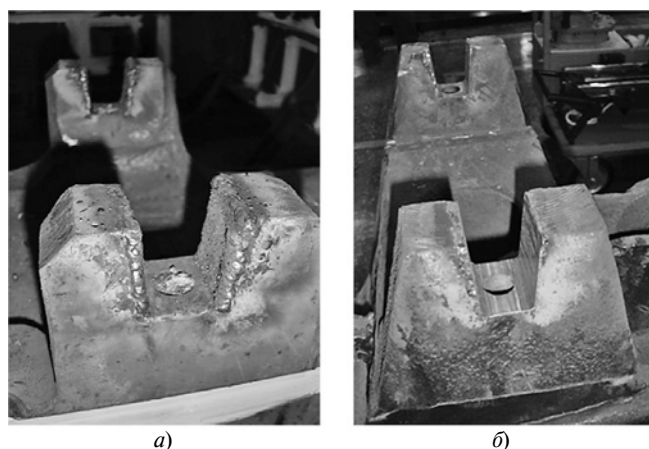


Рис. 2. Вид изношенного паза, наплавленного сварным электродом (а), и паза после фрезерования (б)

После восстановления поверхностей паза осуществляют их фрезерование наборной профильной фрезой (рис. 2, б). Настройка глубины фрезерования проводится на модуле, еще не установленном на раму. Для очередного прохода фрезерную головку устанавливают на глубину, равную разности между очередным и следующим проходом в соответствии с данными таблицы. Продольное перемещение головки при фрезеровании клинового паза осуществляют ходовым винтом.

После фрезерования проводят контрольное измерение клиновых пазов шаблоном с закрепленным целевым знаком с помощью лазерной информационной системы.

Для повышения износостойкости поверхностей клинового паза их упрочняют поверхностно-пластическим деформированием — центробежно-профильной раскаткой, соответствующей форме клинового паза.

### Выводы

Использование портативного станочного модуля с лазерной системой базирования позволяет после измерения и восстановления наплавкой сварочным электродом выполнить фрезерование изношенного клинового паза в соответствии с требованиями чертежа вне заводского производства, т. е. в депо.

Базирование на раме тележки и настройка портативного станочного модуля осуществляются по лазерному пучку и целевым знакам в глобальной технологической системе координат.

Погрешность обработки изношенных клиновых пазов находится в пределах допуска.

Контроль восстановленных клиновых пазов осуществляется лазерно-информационной системой.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Зубарев Ю. М., Косаревский С. В., Ревин Н. Н.** Автоматизация координатных измерений: Учеб. пос. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2011. 160 с.
2. **Пат. 2096741 Рос. Федерация: RU C1.** Способ размерного контроля крупногабаритного изделия и устройство для его осуществления.

## Влияние технологических параметров доводочного шлифования на шероховатость поверхности

Рассматриваются возможности нового технологического процесса — доводочного шлифования, при обработке высокоточных деталей судовых машин и механизмов. Приведены зависимости влияния основных технологических факторов процесса на шероховатость поверхности.

**Ключевые слова:** технологический процесс, доводочное шлифование, параметры, шероховатость, поверхностный слой, износ, математическая модель.

The possibilities of a new technological process — finish grinding, at processing of high-precision parts of ship machinery and mechanisms are considered. The dependences of the influence of the main technological factors of the process on the surface roughness are given.

**Keywords:** technological process, finish grinding, parameters, roughness, surface layer, wear, mathematical model.

Качество поверхностей деталей характеризуется шероховатостью, остаточными напряжениями и микротвердостью, которые в совокупности определяют физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанных деталей [1–3]. В работах [2, 4, 5] показано, что интенсивность разрушения деталей непосредственно связана как с основными характеристиками материала, из которого они изготовлены, так и с качеством и точностью их контактных поверхностей. Детали, обработанные разными технологическими способами, несмотря на идентичность материалов, отличаются, как правило, друг от друга износостойкостью контактных поверхностей. Экспериментальными исследованиями установлено, что износостойкость деталей может отличаться в несколько раз. Поэтому выбор рациональных способов обработки и их оптимальных режимов, обеспечивающих высокие стойкостные характеристики поверхностей деталей, является актуальной задачей.

В данной работе рассматриваются зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от основных факторов — скоростей вращения детали  $V_d$  и круга  $V_k$ , продольной подачи  $S_{пр}$ , зернистости  $Z$  круга, времени обработки  $T$ , доводочного шлифования при обработке высокоточных деталей. Определяются оптимальные параметры доводочного шлифования, позволяющие повысить износостойкость ответственных деталей судовых машин и оборудования.

Исследовали детали судового оборудования из сталей 45, 40X и 3X13.

Шероховатость поверхностного слоя измеряли с помощью профилометра-профилографа мод. 202 с записью профилограмм обработанной поверхности. Круглограмма поверхностей деталей после доводочного шлифования снята на кругломере мод. 290. Изогнутость деталей измеряли специальным индикаторным прибором ПКВ-2, разработанным ОГН "Аз НИПИ нефть". Диаметры отверстий в деталях до и после обработки контролировали индикаторным нутромером. Диаметры наружных поверхностей деталей определяли универсальным измерительным устройством, оснащенным индикаторной головкой.

Доводочное шлифование проводили на станке 3Б227 шлифовальными головками, оснащенными шлифовальными кругами ПП 25А разной зернистости и пропитанными специальными растворами.

Влияние основных факторов доводочного шлифования на шероховатость  $Ra$  поверхности исследовали с использованием многофакторного планирования экспериментов по методике, изложенной в работе [3]. Основные факторы ( $V_d$ ,  $V_k$ ,  $S_{пр}$ ,  $Z$  и  $T$ ) доводочного шлифования варьировались на пяти уровнях. Натуральные значения факторов переводили в кодированные согласно матрице планирования экспериментов. Воспроизводимость опытов проверяли по критерию Кохрена для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . Для каждого из коэффициентов уравнения регрессии рассчитывали значения критерия  $t_p$  Стьюдента, которые сравнивали с табличными значениями  $t_T$ . Проверка по критерию Фишера показала адекватность моделей для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  при  $F_p < F_T$ , где  $F_p$  — четное значение;  $F_T$  — табличное значение.

По результатам обработки экспериментальных данных получили модели доводочного шлифования, определяющие влияние параметров  $V_d$ ,  $V_k$ ,  $S_{пр}$ ,  $Z$  и  $T$  на шероховатость  $Ra$  поверхности: для кодированных значений факторов:

$$\hat{y} = 0,492 + 0,021x_1 - 0,041x_2 + 0,26x_3 + 0,067x_4 - 0,045x_5 - 0,012x_1x_2 + 0,017x_1x_3 + 0,014x_1x_4 + 0,019x_1x_5 - 0,021x_2x_3 - 0,018x_2x_4 + 0,031x_2x_5 + 0,022x_3x_4 - 0,027x_3x_5 - 0,015x_4x_5 + 0,016x_1^2 + 0,011x_2^2 + 0,031x_3^2 + 0,025x_4^2 + 0,017x_5^2; \quad (1)$$

для натуральных значений факторов:

$$\begin{aligned}
 Ra = & 0,711 - 0,091V_d - 0,11V_k + 0,013S_{пр} - \\
 & - 0,0213 - 0,013T - 0,026V_dV_k + 0,016V_dS_{пр} + \\
 & + 0,012V_d^3 - 0,013V_dT - 0,017V_kS_{пр} - 0,011V_k^3 + \\
 & + 0,023V_kT + 0,11S_{пр}^3 - 0,016S_{пр}T - 0,0213T + \\
 & + 0,012V_d^2 + 0,014V_k^2 + 0,023S_{пр}^2 + \\
 & + 0,0173^2 + 0,016T^2. \quad (2)
 \end{aligned}$$

После оптимизации моделей получили следующие значения параметров доводочного шлифования, обеспечивающие минимальный параметр  $Ra$ :  $V_d = 1,32$  м/с;  $V_k = 32$  м/с;  $S_{пр} = 12,4$  мм/об;  $3 = 32$  мкм;  $T = 94$  с.

Таким образом, используя разработанные математические модели, можно варьировать технологическими факторами доводочного шлифования для получения необходимого параметра  $Ra$  шероховатости.

По результатам экспериментов и уравнениям (1) и (2) установлено, что при повышении скорости  $V_d$  параметр  $Ra$  увеличивается (рис. 1), что непосредственно связано с уменьшением числа единичных зерен, осуществляющих резание в зоне обработки. Кроме того, при повышении скорости  $V_d$  увеличивается фактическая площадь обработки при сохранении общего числа царапин, полученных от единичных зерен шлифовальных кругов, что также увеличивает шероховатость  $Ra$ .

В исследованном диапазоне изменений скорости  $V_k$  круга с ее увеличением параметр  $Ra$  шероховатости уменьшается (рис. 2). В работе [6] отмечается, что с увеличением скорости  $V_k$  все абразивные зерна шлифовальных кругов работают как режущие лезвия и в направлении подачи, и по окружности. Отметим также, что с повышением ско-

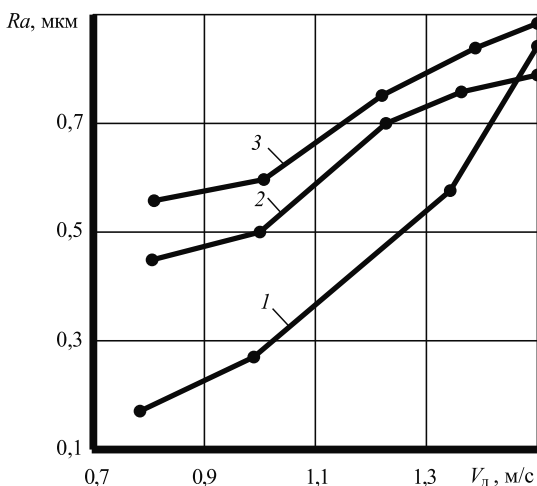


Рис. 1. Зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от скорости  $V_d$  детали при зернистости круга  $3 = 20$  (1), 25 (2) и 32 мкм (3);  $M_k = 32$  м/с;  $S_{пр} = 15$  мм/об

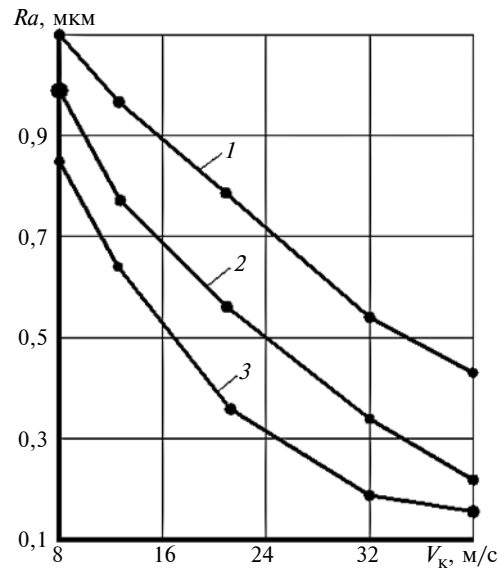


Рис. 2. Зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от скорости  $V_k$  круга при его зернистости  $3 = 20$  (1), 25 (2) и 32 мкм (3);  $V_d = 1,32$  м/с;  $S_{пр} = 15$  мм/об

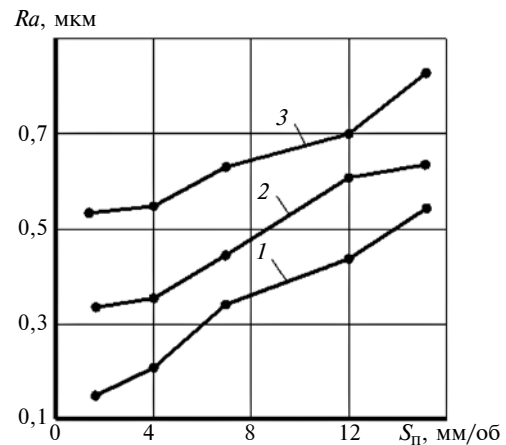


Рис. 3. Зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от продольной подачи  $S_{пр}$  при зернистости круга  $3 = 20$  (1), 25 (2) и 32 (3) мкм;  $V_d = 1,32$  м/с;  $V_k = 32$  м/с

рости  $V_k$  уменьшается сечение среза, что приводит к уменьшению силы резания и вибраций. Создаются необходимые условия для устойчивой обработки, при которой формируются микрорельефы поверхностей с необходимыми параметрами  $Ra$  шероховатости.

При увеличении продольной подачи  $S_{пр}$  параметр  $Ra$  шероховатости также увеличивается (рис. 3). Это можно объяснить повышением длительности обработки шлифовальным кругом за определенный период времени. Поскольку время работы круга за один оборот детали уменьшается с повышением  $S_{пр}$ , то увеличение параметра  $Ra$  в этой ситуации вполне закономерно.

Увеличение зернистости  $3$  круга также приводит к увеличению микронеровностей в результате

уменьшения числа режущих зерен и увеличения удельной площади обработки, приходящейся на одно зерно (рис. 4).

При увеличении времени  $T$  обработки шероховатость  $Ra$  уменьшается (рис. 5). Указанная закономерность справедлива до определенного периода времени приработки единичных зерен, так как с уменьшением выступа единичных зерен уменьшается шероховатость  $Ra$ . Превышение оптимального времени  $T$  обработки существенного влияния на величину  $Ra$  не оказывает.

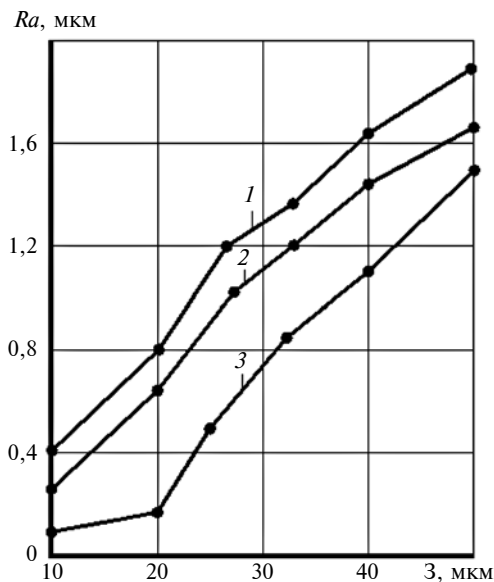


Рис. 4. Зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от зернистости 3 круга при скорости детали  $V_d = 0,8$  (1), 1,2 (2) и 1,32 (3) м/с;  $S_{пр} = 15$  мм/об;  $V_k = 32$  м/с

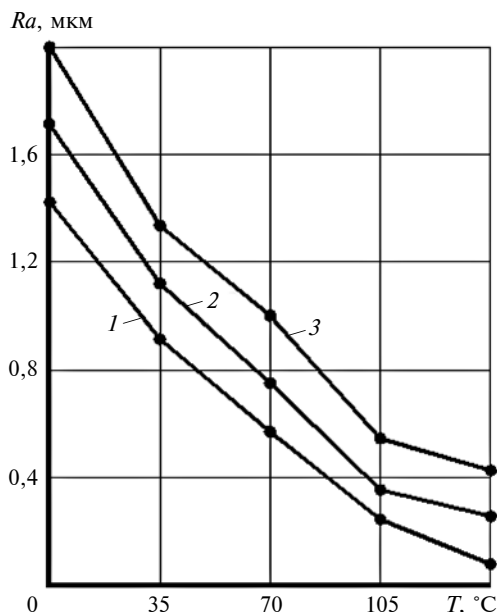


Рис. 5. Зависимости шероховатости  $Ra$  поверхности от времени  $T$  работы и скорости  $V_d$  детали при зернистости круга 3 = 20 (1), 25 (2) и 32 мкм (3);  $S_{пр} = 15$  мм/об;  $V_k = 32$  м/с

Для проверки точности моделей (1), (2) и достоверности результатов экспериментов кроме многофакторного планирования провели дополнительные исследования с применением классических методов [7, 8]. Результаты исследований показали, что полученные данные можно описать законом нормального распределения в виде зависимостей [9]:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx; \\ f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \end{cases} \quad (3)$$

где  $-\infty < x < \infty$ .

Основными характеристиками уравнений (3) являются: математическое ожидание  $M(x) = \mu$ ; дисперсия  $D(x) = \sigma^2$ ; коэффициент вариации  $v = \sigma/\mu$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ ;  $-\infty < \mu < +\infty$  и  $\sigma > 0$  — параметры сдвига и масштаба.

Зависимости (3) можно представить в виде функции Лапласа  $\Phi(z)$  или плотности распределения  $\varphi(z)$ :

$$\begin{cases} \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz; \\ \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right], \end{cases} \quad (4)$$

где  $z = (x - \mu)/\sigma$ .

Отметим, что значения  $\Phi(z)$  в формуле (4) табулированы. Табличное значение интеграла  $\Phi(z)$  численно равно площади фигуры между кривой распределения и осью абсцисс, ограниченной осью симметрии кривой и ординатой  $x$ .

Функции  $\Phi(z)$  и  $F(x)$  связаны соотношениями:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \Phi(z);$$

$$\Phi(-z) = -\Phi(z).$$

Кроме того, зависимости (3) можно задать квантилем  $U_P$  и уровнем  $P$ , по которым определится вероятность случайной величины  $x$ :

$$x_P = M(x) + U_P\sigma.$$

Согласно работе [10] для зависимостей (3) вероятность нахождения в пределах интервала, ограниченного точками, расположенными на расстоянии  $\sigma$  от математического ожидания, составляет 0,61813, для интервала от  $M(x) - 2\sigma$  до  $M(x) + 2\sigma$  составляет 0,9544, для интервала от  $M(x) - 3\sigma$  до  $M(x) + 3\sigma$  составляет 0,9973, т. е. с вероятностью 99,73 %. Можно считать, что

$$M(x) - 3\sigma \leq x \leq M(x) + 3\sigma.$$

Если случайные величины характеризуются только положительными значениями, то принимается усеченное нормальное распределение и уточняются расчеты при больших значениях  $v = \sigma/\mu$ .

При этом плотность вероятности записывается с коэффициентом  $C$  пропорциональности:

$$f(x) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5)$$

где  $x_0$  — мода;  $C$  — устанавливается изменением  $x$  от  $a$  до  $b$  по формуле  $\int_a^b f(x)dx = C[F(b) - F(a)] = 1$ .

Откуда определяем

$$C = \frac{1}{F(b) - F(a)} = \frac{1}{\Phi\left(\frac{b-x_0}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-x_0}{\sigma}\right)}, \quad (6)$$

где  $F(a)$  и  $F(b)$  — значения интегральной функции нормального распределения для предельных значений  $x$ .

Выражение (5) применяют в основном при предельных значениях  $a = 0$  и  $b = \infty$  с учетом того, что  $\Phi(\infty) = 0,5$  и  $\Phi(-z) = \Phi(z)$ . Тогда формула (6) принимает вид:

$$C = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi\left(-\frac{x_0}{\sigma}\right)} = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{x_0}{\sigma}\right)}. \quad (7)$$

Для определения коэффициента  $C$  используют таблицы функции Лапласа.

При  $0 \leq x \leq \infty$  характеристики усеченного нормального распределения записываются в виде:

$$\bar{M}(x) = M(x) + R\sigma;$$

$$\bar{D}(x) = \bar{\sigma}^2 \sigma^2 \left[1 - R^2 - R \frac{M(x)}{\sigma}\right],$$

где  $\bar{M}(x)$ ,  $\bar{D}(x)$  и  $\bar{\sigma}$  — те же параметры, что и для нормального распределения;  $R = \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{M^2(x)}{2\sigma^2}\right]$ .

Из равенства (7) видно, что при  $x_0 > 2\sigma$  параметр  $C$  мало отличается от единицы  $C \approx 1$ , поэтому при усеченном распределении он не учитывается. В этих условиях  $\bar{M}(x) \approx M(x)$ ,  $\bar{\sigma} \approx \sigma$ .

Интегральное выражение для усеченного распределения имеет вид

$$F(x) = C \left[ \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right) \right].$$

Если логарифм случайной величины задан по нормальному закону, его, как правило, описывают логарифмическим законом [9]:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx;$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad x > 0.$$

Основными показателями логарифмического распределения являются:

$$\bar{M}(x) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right);$$

$$D(x) = \exp(\mu + \sigma^2)[\exp(\sigma^2) - 1];$$

$$V = \sqrt{\exp(\sigma^2)} - 1.$$

При вычислениях логарифмических функций можно использовать таблицы нормального распределения, так как

$$F(x) = \left[ \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right) \right];$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x} \varphi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right).$$

По результатам исследований определен комплекс оптимальных параметров процесса доводочного шлифования, обеспечивающий требуемую точность и качество высокоточных ответственных деталей судовых машин и оборудования. Предложены математические модели доводочного шлифования, устанавливающие связь между факторами процесса и шероховатостью  $Ra$ .

Определяющее значение основных фактов процесса в достижении требуемой шероховатости и износостойкости поверхностей деталей подтверждают и другие исследования [11–15].

Разработанные конструкции шлифовальных головок и процесс доводочного шлифования прошли успешные испытания и рекомендованы для внедрения в производство.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ящерицын П. И.** Прогрессивная технология финишной обработки деталей. Минск: Беларусь, 1978. 175 с.
2. **Гафаров А. М.** Технологические способы повышения износостойкости деталей машин. Баку: Наука, 1998. 318 с.
3. **Гафаров В. А.** Шлифование с виброгашением. Баку: Наука, 2006. 124 с.

## Технология обработки шпоночных пазов в длинномерных маложестких валах

Для обработки шпоночных пазов в длинномерных маложестких валах предлагаются технология и установка, разработанная на базе токарного станка, с дополнительной станиной с самоцентрирующимися люнетами, что позволило повысить точность фрезерования пазов в 3—5 раз по сравнению с их традиционной обработкой.

**Ключевые слова:** фрезерование шпоночных пазов, расчет деформации, установка, самоцентрирующие люнеты, фрезерная головка.

For processing of keyway slots in long, non-rigid shafts, a technology and a bench developed on the basis of a lathe with an additional bed with self-centering lunettes are proposed, which made it possible to increase the accuracy of grooves milling by 3—5 times compared to their traditional processing.

**Keywords:** keyway slots milling, calculation of deformation, bench, self-centering lunettes, milling head.

С развитием новых отраслей машиностроения быстро увеличивается производство разного технологического оборудования с длинномерными валами-роторами. Возрастающие требования к качест-

ву насосов и турбин требуют повышения точности валов-роторов [1—3]. Увеличение моментов, передаваемых валами-роторами, не обеспечивается посадкой рабочих колес на вал с натягом и неизбежно приводит к использованию шпоночных соединений. Трудоемкость изготовления валов-роторов возрастает с увеличением их длины и уменьшением диаметра [4, 5]. Необходимы прогрессивные методы изготовления валов-роторов, что, однако, сопряжено с большими материальными затратами и трудоемкостью, а также тесно связано с производительностью. Поэтому изготовление длинномерных валов-роторов — одна из важнейших задач машиностроения, а поиск резервов повышения точности обработки и ее последующее сохранение — актуальная научная проблема технологии машиностроения [6, 7]. Конструкция маложесткого вала предусматривает наличие различных конструктивных элементов — пазов, лысок и др., которые формируются, как правило, механической обработкой после получения цилиндрических поверхностей заданных размеров [8].



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 59)

4. Джанахмедов А. Х. Нефтяная трибология. Баку: Наука, 2003. 326 с.

5. Гафаров А. М., Сулейманов П. Г. Износостойкостные характеристики тяжело нагруженных деталей машин и механизмов, эксплуатируемых в чрезвычайных и экстремальных ситуациях // Технология машиностроения. 2011. № 5. С. 37—44.

6. Маталин А. А. Технология механической обработки. Л.: Машиностроение, 1977. 426 с.

7. Гафаров А. М. Прогрессивные методы механической обработки: в 2 т. Баку: Наука, 2001. Т. 1. 286 с., Т. 2, 310 с.

8. Определение рациональных параметров технологических операций при обработке высокоточных деталей машин, работающих в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров, Ф. М. Калбиев // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. 2015. № 4. С. 50—59.

9. Невзоров В. Н., Сугак Е. В. Надежность машин и оборудования. В 2-х т. Красноярск: СГТУ, 1998. Т. 1. 240 с.

10. Венцель Е. С., Овгаров Л. А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1973. 260 с.

11. Джанахмедов А. Х. Анализ изнашивания ходовой пары задвижки в условиях упруго-пластического деформирования // Трения и износ. 2005. № 2. С. 42—50.

12. Сулейманов П. Г. Триботехнические характеристики деталей машин, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Баку: Наука, 2013. 186 с.

13. Гафаров А. М., Алиев Ч. М., Кулиев А. М. Исследование пооперационного изменения качества поверхностного слоя высокоточных деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами // Вестник Государственного университета морского и речного Флота им. адмирала С. О. Макарова, 2017. Т. 9. № 4. С. 7752—7764.

14. Солер Я. Н., Нгуен Ван Кан. Обеспечение точности формы инструментов при плоском шлифовании кругами Horton Vitrim // Вестник машиностроения. 2016. № 11. С. 51—58.

15. Гафаров А. М., Шарифов З. З., Алиев Ч. М. Исследование шероховатости поверхности деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой // Вестник машиностроения. 2018. № 2. С. 77—82.

16. Гафаров А. М., Сулейманов П. Г., Гафаров В. А. Исследование качества поверхности деталей, обработанных ротационным хонингованием и работающих в экстремальных условиях // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 63—68.

Нарушение равновесия остаточных напряжений в вале и создание в поверхностных слоях начальных напряжений при формировании пазов или лысок резанием приводит к дополнительным технологическим остаточным деформациям наряду с остаточными деформациями после обработки цилиндрических поверхностей вала. При выводе расчетных зависимостей приняли следующие допущения:

1) остаточные деформации в вале, обусловленные формированием пазов и лысок, определяются без учета деформации от предшествующей обработки цилиндрических поверхностей, при этом итоговая остаточная деформация определяется их суммированием;

2) принимаются известные функции, описывающие остаточные напряжения в вале, имеющие место к моменту формирования пазов или лысок, и напряжения, формируемые в поверхностном слое при резании.

Для определения остаточных деформаций вал представляется упругой балкой, нагруженной распределенными моментами сил на участках формирования шпоночных пазов (рис. 1). За распре-

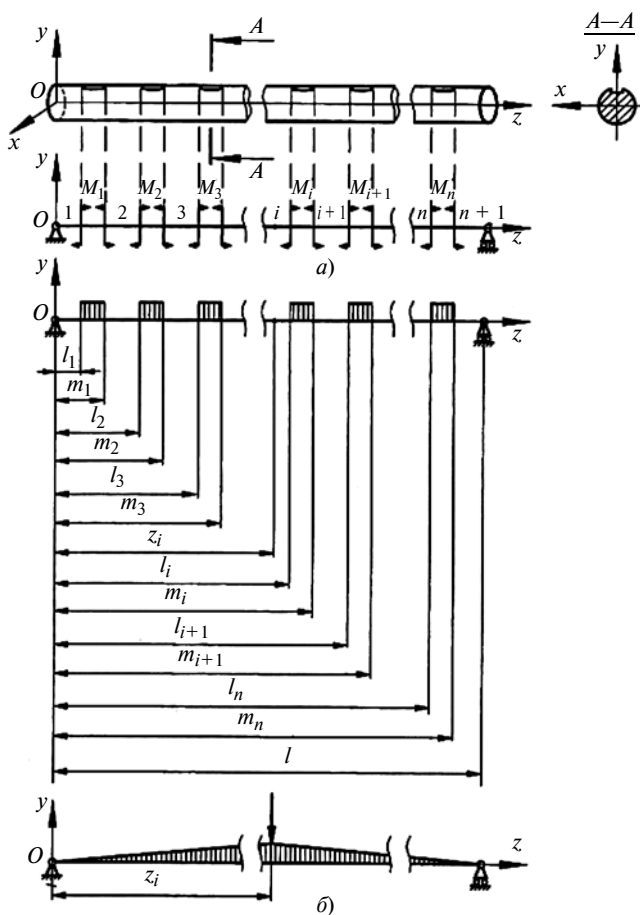


Рис. 1. Расчетная схема определения деформаций при формировании пазов: а — схема нагружения (1, 2, ..., n + 1 — промежуточные участки); б — эпюра нагружения (i — точка, в которой определяется перемещение)

ленный момент сил принимаются моменты, возникающие в поперечных сечениях вала в результате нарушения уравнивающего напряженного состояния при формировании паза или лыски, а длины участков нагружения соответствуют длинам данных элементов. Если элемент формируется в разных плоскостях, проходящих через ось вала, то остаточные деформации определяются в каждой плоскости отдельно, а итоговая — как векторная сумма. В расчетах рассматривается формирование шпоночных пазов в одной из плоскостей.

Участки, имеющие эпюры моментов, называются нагруженными, не имеющие — промежуточными. Используя метод Мора для точки вала с координатой, отсчитываемой от левого торца, перемещения определяем по формулам:

для промежуточных участков

$$\delta_i = \frac{1}{EJ} \left[ \frac{M_1}{2} \left( 1 - \frac{Z_i}{l} \right) (m_1^2 - l_1^2) + \dots + \frac{M_{i-1}}{2} \left( 1 - \frac{Z_i}{l} \right) (m_{i-1}^2 - l_{i-1}^2) + \dots + M_i z_i (m_i - l_i) \left( \frac{2l - m_i - l_i}{2l} \right) + \dots + M_n Z_n (m_n - l_n) \left( \frac{2l - m_n - l_n}{2l} \right) \right]; \quad (1)$$

для нагруженных участков

$$\delta_i = \frac{1}{EJ} \left[ \frac{M_1}{2} \left( 1 - \frac{Z_i}{l} \right) (m_1^2 - l_1^2) + \dots + \frac{M_i}{2} \left( 1 - \frac{Z_i}{l} \right) (Z_i^2 - l_1^2) + M_i (m_i - Z_i) \left( \frac{2l - m_i - Z_i}{2l} \right) Z_i + \dots + M_{i+1} (m_{i+1} - l_{i+1}) \left( \frac{2l - m_{i+1} - l_{i+1}}{2l} \right) Z_i + \dots + M_n (m_n - l_n) \left( \frac{2l - m_n - l_n}{2l} \right) Z_i \right], \quad (2)$$

где \$M\_1, \dots, M\_n\$ — моменты на участках вала от 1 до \$n\$; \$l\_1, \dots, l\_n\$ — расстояния от левого торца вала до начала паза от 1 до \$n\$; \$m\_1, \dots, m\_n\$ — расстояния от левого торца вала до конца паза от 1 до \$n\$; \$J\$ — момент инерции поперечного сечения вала.

Изгибающий момент \$M\_n\$ для паза определится как сумма моментов от нарушения равновесного состояния остаточных напряжений в вале и от начальных напряжений в поверхностном слое, создаваемых при резании паза. Для удобства определения момента, создаваемого при формировании шпоночного паза, представим его в прямоугольных координатах (рис. 2). С целью упрощения конеч-



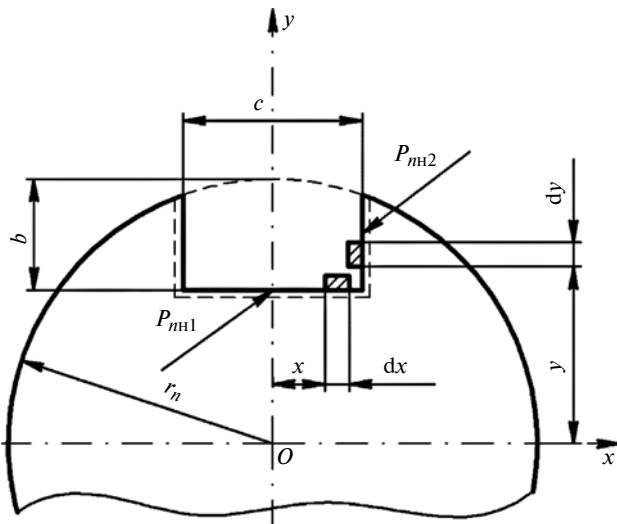


Рис. 2. Расчетная схема для определения изгибающего момента при формировании шпоночного паза

ных зависимостей изгибающее действие от начальных напряжений заменим подобным действием сил, равных их интегральной характеристике. Для шпоночного паза силы действуют на участках его дна и боковых стенок соответственно.

Остаточные деформации маложесткого вала, обусловленные формированием шпоночных пазов, расположенных по его длине, можно значительно уменьшить, располагая пазы оппозитно друг к другу. В случае конструктивного наличия одного паза в середине длины вала его можно заменить симметрично и противоположно расположенными пазами меньшего сечения с учетом расчетных конструктивных требований по передаваемым усилиям. Кроме того, можно использовать данное воздействие, располагая пазы в сечениях  $z$  с учетом уменьшения или нейтрализации остаточных деформаций, возникающих при формировании цилиндрических поверхностей.

Для реализации аналитических исследований разработали установку на базе токарного станка для фрезерования пазов, лысок и сверления отверстий [8]. При замене фрезерного модуля на резцовый или шлифовальный модуль на установке можно проводить все операции механической обработки.

Изгибающий момент  $M_n$  для  $n$ -го паза определяется как сумма моментов от нарушения равновесного состояния остаточных напряжений в вале ( $M_{n\text{об}}$ ) и от начальных напряжений в поверхностном слое, возникающих при нарезании паза ( $M_{n\text{н}}$ ). Для удобства определения момента  $M_{n\text{об}}$  представим его в прямоугольных координатах (см. рис. 2) в виде уравнения

$$dM_{n\text{об}} = \sigma_n(\sqrt{x^2 + y^2}) y dx dy. \quad (3)$$

Из уравнения (3) определим

$$M_{n\text{об}} = -2 \int_0^{c/2} \int_{r_n-b}^{\sqrt{r_n^2-x^2}} \sigma_n(\sqrt{x^2+y^2}) y dx dy, \quad (4)$$

где  $b$  и  $c$  — глубина и ширина шпоночного паза.

Для упрощения конечных зависимостей изгибающее действие от начальных напряжений заменим подобным действием сил, равных их интегральной характеристике и приложенных к поверхностям паза. Для шпоночного паза силы действуют на участках его дна и боковых стенок:

$$\begin{cases} dM_{n\text{нд}} = P_{n\text{н1}}(r_n-b)dx; \\ dM_{n\text{нб}} = P_{n\text{н2}}ydy, \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_{n\text{нд}}$  и  $P_{n\text{нб}}$  — интегральные характеристики начальных напряжений на участке дна  $n$ -го паза и боковых стенках.

После интегрирования уравнений (5) и суммирования с равенством (4) определим

$$M_n = -2 \int_0^{c/2} \int_{r_n-b}^{\sqrt{r_n^2-x^2}} \sigma_n(\sqrt{x^2+y^2}) y dx dy + P_{n\text{н1}}(r_n-b)c + P_{n\text{н2}}\left(2r_nb - b^2 - \frac{c^2}{4}\right), \quad (6)$$

где  $b$  и  $c$  — глубина и ширина по внешней хорде соответственно.

Для аналитических исследований разработали установку на базе токарного станка РВ-104 для фрезерования шпоночных пазов, лысок и сверления отверстий. При замене фрезерного модуля на резцовый или шлифовальный модуль на установке можно выполнять все виды механической обработки на одном станке без смены баз.

Установка самоцентрирующих люнетов (СЦЛ) в зонах образования узлов пучностей заготовки обеспечивает максимальную жесткость технологической системы при минимальных возмущениях. При этом происходит одновременное демпфирование заготовки в сечениях между опорами, что повышает точность обработки в результате уменьшения интенсивности колебаний заготовки.

Зажимные цилиндрические ролики, установленные на рычаги с возможностью поворота на  $45^\circ$ , обеспечивают их постоянный контакт с заготовкой, в том числе и при прохождении инструмента под СЦЛ при точении, а также базирование по конической поверхности.

Установка СЦЛ на поперечном суппорте малой станины под углом  $\beta = 30^\circ \div 40^\circ$  обеспечивает беспрепятственный проход инструмента под СЦЛ,

компенсацию силы резания в пространстве и минимальную погрешность при обработке в результате ориентации оси максимальной жесткости вдоль равнодействующей силы резания при фрезеровании и точении. Схема установки, монтируемой на токарном станке, приведена на рис. 3, фото — на рис. 4.

При фрезеровании шпоночных пазов в разных плоскостях необходимо заготовку повернуть вокруг своей оси, для чего заднюю бабку заменяют стандартной делительной головкой 15 (см. рис. 3). Установка содержит основную станину 1 и жестко прикрепленную к ней станину 2 с опорами 3. На станине 2 размещены продольные суппорты 4, на которых монтируются поперечные суппорты 5 с шаговыми приводами 6. На верхнем основании поперечных суппортов 5 закреплены СЦЛ 7 с шаго-

выми приводами 8. Люнеты 7 оснащены контуром автоматического управления, включающим датчики положения инструмента (на рисунках не показаны) по длине заготовки, выходы которых подключены к входам вычислительного устройства 9, а выход последнего подключен к входам шаговых приводов 6 суппортов 5 малой станины и входам шаговых приводов 8 СЦЛ 7. Зажимные цилиндрические ролики 10 размещены (см. рис. 3, Б—Б) на поворотных рычагах 11, установленных на неподвижных осях 12, которые закреплены на торцах рычагов 13 СЦЛ 7.

Резцедержатель базового станка после точения заменяют фрезерной головкой 14, которая представляет собой шпиндельный узел с приводом от асинхронного двигателя переменного тока. В шпинделе выполнен инструментальный конус для уста-

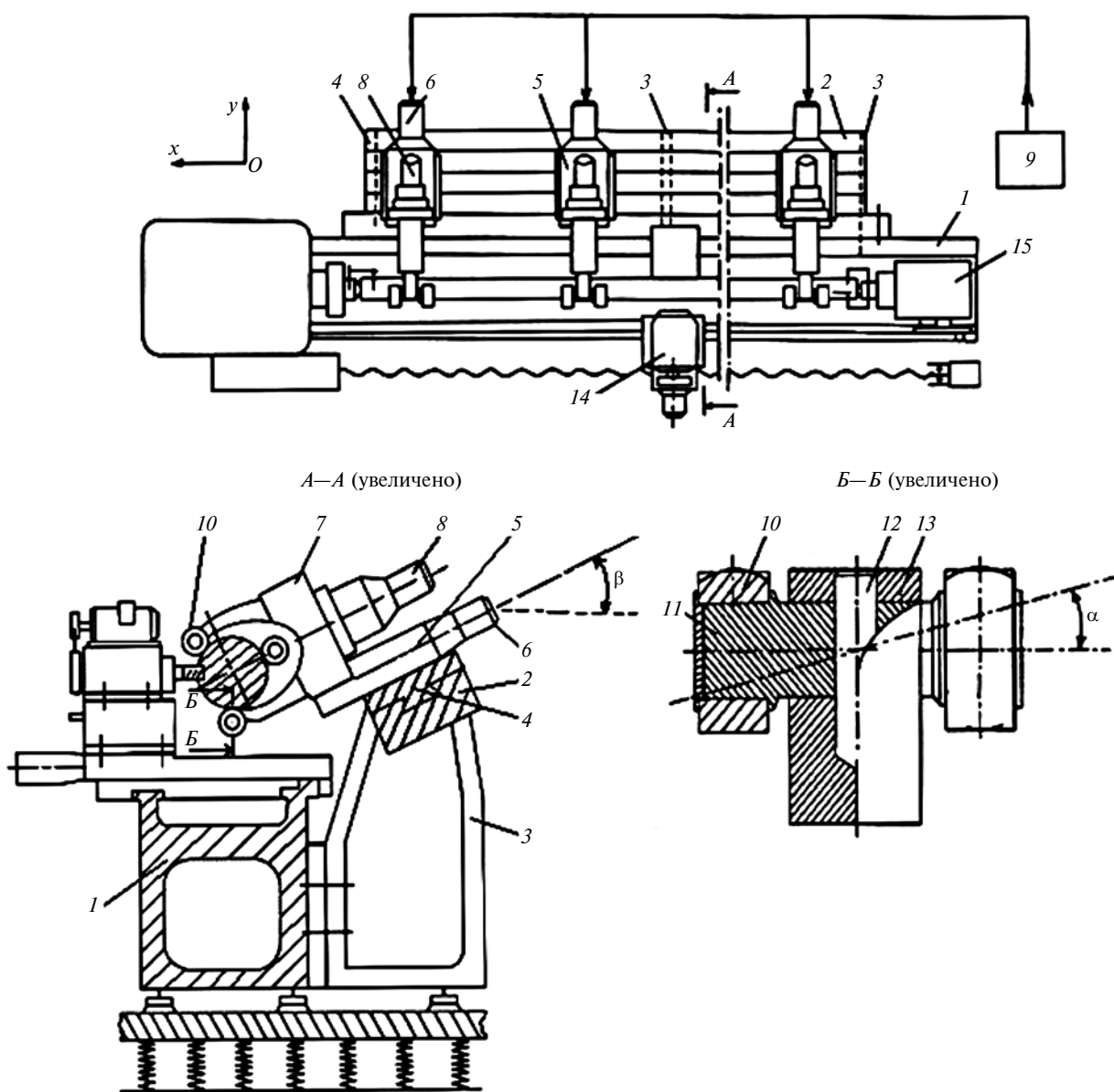


Рис. 3. Установка для точения и фрезерования шпоночных пазов длинномерных осесимметричных деталей

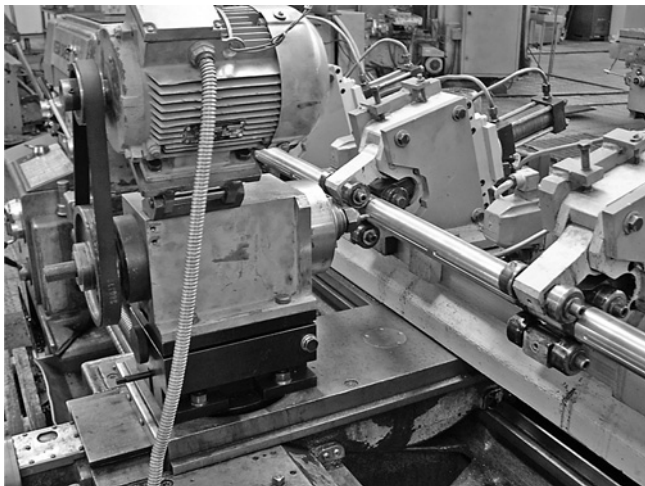


Рис. 4. Общий вид установки с зоной СЦЛ фрезерования

новки стандартного инструмента и переходных оправок. Вращение с двигателя на шпиндель передается поликлиновой передачей. Конструкция фрезерной головки позволяет работать осевым инструментом диаметром до 20 мм. Частота вращения регулируется бесступенчато электронным блоком управления. Для установки и выверки фрезерной головки используют регулирующую подставку, обеспечивающую вертикальное перемещение и фрезерование паза нестандартной ширины.

Материал заготовки — сталь 40Х; инструмент — шпоночная фреза диаметром 8 мм из стали Р6М5. Режим резания: скорость —  $v = 10 \div 15$  м/мин; подача на зуб —  $S_z = 0,05$  мм/зуб; глубина паза —  $t = 5$  мм; частота вращения фрезы —  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>.

Требуемая частота вращения фрезы устанавливается частотным преобразователем ATV28HU54N4. Продольная подача при фрезеровании устанавливается органами настройки станка. Глубина фрезеруемого паза настраивается вручную. Параметры взаимного расположения обработанных поверхностей измеряли на координатно-измерительной машине фирмы "Маузер", погрешность измерения составляла 1 мкм. Результаты измерений обрабатывали на ЭВМ в программе MathCAD 2001i по порядку обработки статистических данных.

Экспериментальный метод обработки шпоночных пазов на токарном станке с использованием СЦЛ фрезерной и делительной головок обеспечи-

вает отклонение шпоночного паза от симметричности относительно наружной цилиндрической поверхности на величину  $\Delta = Y_2 \pm S_2/2$ , т. е.  $\Delta = 0,068 \pm 0,006$  мм. В то же время действующей технологией обработки обеспечивается отклонение от симметричности  $\Delta = Y_1 \pm S_1/2$ ,  $\Delta = 0,34 \pm 0,018$  мм. Таким образом, предлагаемая технология получения шпоночных пазов обеспечивает в 5 раз меньшую их несимметричность и в 3 раза меньший разброс значений по сравнению с действующей технологией.

Внедрение разработанной установки, кроме повышения точности, сокращает цикл изготовления деталей типа валов за счет уменьшения вспомогательного времени на перемещение заготовки с токарной на фрезерный станок и высвобождает дорогостоящее фрезерное оборудование для обработки длинномерных валов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Драчев О. И. Технология изготовления маложестких симметричных деталей. М.: Политехника, 2005. 289 с.
2. Фещенко В. Н., Махмутов Р. Х. Токарная обработка: Учебник. М.: Высшая школа, 2005. С. 24, 47.
3. Горланов С. Н., Салабаев Д. Е., Бобровский А. В. Технологический метод достижения повышенной точности шпоночных пазов в маложестких осесимметричных деталях // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 7. С. 28—30.
4. Заковоротный В. Л., Волошин Д. А., Родригес С. Б. Методика моделирования упругих деформаций цилиндрических концевых фрез в процессе фрезерования // Исследование станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей. Саратов: Изд-во СГУ, 2003. С. 45—50.
5. Self-oscillation suppression when turning non-rigid shafts using spring tools and the headstock / V. Svinin, A. Samsonov, A. Savilov, A. Pyatykh // MATEC Web of Conferences 224, 01059 (2018) <https://doi.org/10.105/mateconf/201822401059> ICMTMTE 2018.
6. Городецкий Ю. И., Цибовская И. В. К теории возбуждения вибраций при торцевом фрезеровании // Динамика технологических систем. Саратов: Изд-во Саратовского ГУ, 2004. С. 80—84.
7. Бобровский А. В. Повышение точности обработки и стабильности форм маложестких длинномерных деталей путем автоматического управления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ "Станкин". 1999. 20 с.
8. Пат. 2492030 Рос. Федерация: МПК В23В 1/00. Способ обработки тел вращения.

### ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА "ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ"

Подписка на журнал принимается по каталогу:

"Пресса России" — индекс 27841



## Технология снижения температуры при шлифовании быстрорежущей стали

Рассматривается изменение температуры при шлифовании быстрорежущей стали эльборовыми шлифовальными кругами с их смазыванием твердым материалом при обработке и без смазывания. Сопоставляются экспериментальные и практические результаты измерений температуры шлифования. Показана эффективность предлагаемой композиции твердого смазочного материала.

**Ключевые слова:** шлифование, твердый смазочный материал, эльборовый шлифовальный круг, быстрорежущая сталь, контактная температура, термопара, температурное поле.

The temperature change during grinding of high-speed steel by grinding wheels from el'bor borazon material with their lubrication by solid material during processing and without lubrication is considered. The experimental and the practical results of grinding temperature measurements are compared. The effectiveness of the proposed composition of solid lubricant is shown.

**Keywords:** grinding, solid lubricant, grinding wheel from el'bor borazon material, high-speed steel, contact temperature, thermocouple, temperature field.

Создание новых технологий металлообработки [1—4] сейчас наиболее востребовано для производства конкурентоспособной высокотехнологичной продукции машиностроения.

Металлообработка связана с тепловыми явлениями, которые оказывают значительное влияние как на сам процесс, так и на качество обрабатываемой поверхности. Работа, затрачиваемая при снятии стружки, трении и деформациях, переходит в тепло, создающее высокотемпературное поле в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали. Деформация и нагрев металла происходят очень быстро (за доли секунды), и основное количество тепловой энергии концентрируется в тонком поверхностном слое обрабатываемой детали. Этому способствует и сравнительно низкая теплопроводность быстрорежущих сталей.

При шлифовании после прохождения абразивного инструмента обрабатываемый поверхностный слой быстро охлаждается. Такие перепады температур приводят, как правило, к структурным изменениям в тонком поверхностном слое шлифуемого металла, вызывают появление остаточных напряжений и, как следствие, образование микротрещин. Для оценки тепловых явлений при шлифовании и

их влияния на состояние поверхностного слоя необходимо знать температуру в зоне контакта абразивного инструмента с деталью, т. е. контактную температуру поверхности.

В производстве при шлифовании труднообрабатываемых материалов активно используют твердые смазочные материалы (ТСМ). При этом достигается снижение напряженности процесса шлифования (изменяются силовые и снижаются тепловые характеристики, уменьшается расход абразивного инструмента, улучшается качество обрабатываемой поверхности) [5—8]. Широкое применение ТСМ требует рассмотрения механизма их воздействия на процесс шлифования при взаимодействии абразивного круга и обрабатываемой поверхности [9] и выявления закономерностей образования и распределения тепловых потоков в процессе обработки. В статье приведены теоретические расчеты тепловых процессов шлифования быстрорежущей стали как при нанесении ТСМ, так и без него, а также дано сравнение полученных результатов с экспериментальными.

Эксперименты проводили на модернизированном заточном станке 3А64Д, оснащенный приспособлением для нанесения смазочного материала в процессе шлифования методом фиксированной подачи бруска ТСМ [10—12] на один двойной ход продольной подачи станка. Шлифовали образцы высотой  $B = 7$  мм из закаленной быстрорежущей стали с разной степенью легирования. В качестве твердой смазки использовали бруски сечением  $10 \cdot 10$  мм<sup>2</sup> из композиции на основе гексагонального нитрида бора и стеарина.

Для измерения осредненной контактной температуры шлифования хромелевую или константановую проволоку размещали между двумя пластинками обрабатываемого материала, предварительно изолируя ее прокладками слюды. Другим электродом служил шлифуемый образец. При шлифовании абразивные зерна круга через изоляцию стягивают на шлифуемую поверхность металл проволоки и образуют в полученной таким образом микропаре точечный контакт горячего спая.

Для расчета температуры в зоне контакта и температурного поля в обрабатываемой детали использовали закон теплопроводности Фурье [13]: количество  $dQ$  тепла, проходящего вследствие теплопроводности за время  $dt$  через элемент изотермической поверхности площадью  $dS$ , пропорционально паде-

нию температуры  $\left(-\frac{\partial T}{\partial n}\right)$  в направлении нормали  $n$  к этой поверхности, площади  $dS$  и времени  $dt$ , т. е.

$$dQ = \lambda \left(-\frac{\partial T}{\partial n}\right) dS dt. \quad (1)$$

Знак "минус" в уравнении (1) указывает на то, что тепло передается в сторону убывания температуры. Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называется коэффициентом теплопроводности и является физическим параметром, характеризующим способность вещества проводить тепло.

Количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу площади, называется плотностью теплового потока и определяется по формуле

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}.$$

Для вывода уравнения теплопроводности приняли ряд ограничений: теплопроводящее тело однородно и изотропно; внутренние источники тепла отсутствуют; теплофизические параметры постоянны. В этих условиях теплопередачу в неподвижной твердой среде, которая осуществляется только в результате теплопроводности [14], можно определить уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (2)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа;  $C$  — удельная теплоемкость;  $\gamma$  — плотность материала;  $a = \lambda/(C\gamma)$  — коэффициент температуропроводности, характеризующий теплоинерционные свойства материала.

Уравнение (2) можно решить разными методами. Для расчета температурных полей в различных технологических процессах наибольшее распространение получил метод источников, или метод Грина.

Рассмотрим бесконечно длинный источник, совпадающий с осью  $y$ . Пусть источник движется в положительном направлении оси  $z$  со скоростью теплового потока  $q'$ , представляющей собой количество тепла, выделяющегося на единицу длины в единицу времени. Если источник действует в течение времени  $t'$ , то созданное им температурное поле можно представить уравнением

$$T = \int_0^t \frac{q' dt'}{C\gamma 4\pi a(t-t')} \exp\left(-\frac{x^2 + [z + v(t-t')]^2}{4a(t-t')}\right), \quad (3)$$

где  $v$  — коэффициент конвекции, когда перенос теплоты осуществляется не только в результате теплопроводности, но и движением нагретой среды.

В случае же торцевого шлифования чашечным инструментом зона контакта круга с обрабатываемой деталью представляется в виде полосы.

Рассмотрим источник тепла в виде бесконечно длинной полосы шириной  $2h$ , расположенной в плоскости  $yOz$  вдоль оси  $y$ , который движется в положительном направлении оси  $z$ . Если вместо линейной плотности тепловой мощности  $q'$  в уравнение (3) ввести плотность теплового потока  $q$ , то можно определить температурное поле от элементарного линейного источника и заполнить такими источниками всю полосу:

$$T = \int_{-h}^h dz' \int_0^t \frac{q dt'}{C\gamma 4\pi a(t-t')} \exp\left(\frac{x^2 + [z - z' + v(t-t')]^2}{4a(t-t')}\right).$$

Заменив переменные

$$\frac{x^2 + z'^2}{4a(t-t')} = \xi; \quad \frac{dt'}{t-t'} = \frac{d\xi}{\xi},$$

получим:

$$T = \int_{-h}^h dz' \frac{q}{2\pi\lambda} \exp\left[-\frac{v(z-z')}{2a}\right] \times \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{d\xi}{\xi} \exp\left[-\left(\xi + \frac{v^2 r^2}{16a^2 \xi^2}\right)\right]. \quad (4)$$

В результате дальнейших преобразований формулы (4) приведем внутренний интеграл в формуле (4) к известному интегральному представлению модифицированной функции Бесселя второго ряда нулевого порядка [13]:

$$K_0(m) \int_0^{\infty} \frac{dz}{z} \exp\left[-\left(m^2 z^2 + \frac{1}{4z^2}\right)\right],$$

где  $m$  — коэффициент пропорциональности;  $K_0$  — поправочный коэффициент.

Для установившегося процесса шлифования получим выражение:

$$T = \int_{-h}^h dz' \frac{q}{2\pi\lambda} \exp\left[-\frac{v(z-z')}{2a}\right] K_0\left[\frac{v}{2a} \sqrt{x^2 + (z-z')^2}\right] dz.$$

При замене

$$\frac{v(z-z')}{2a} = \xi; \quad -\frac{v dz'}{2a} = d\xi$$

получим функцию

$$T = \frac{qa}{\pi\lambda V} \int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) d\xi, \quad (5)$$

где  $V$  — скорость источника тепла;  $K_0$  — коэффициент пропорциональности;  $X$  и  $H$  — безразмерные величины теплового поля по координатам  $x$  и  $h$ ,  $X = Vx/(2a)$  и  $H = Vh/(2a)$ .

Функция (5) описывает температурное поле источника в виде полосы шириной  $2h$ , движущегося в бесконечной теплопроводящей среде. Выражение

(5) использовали в расчетах температурных полей при шлифовании с учетом данных Приложения 1 [13]. Оно просчитано в широком диапазоне изменения основных параметров и значения интеграла, входящего в уравнение (5).

Таким образом, для описания теплового процесса в шлифуемых деталях выбрали его математическую модель, основанную на уравнении теплопроводности. В конкретных случаях уравнение дополняется начальными и граничными условиями. В нашем случае приняты следующие допущения.

1. Распределение плотности теплового потока по зоне шлифования считаем равномерным (начальное условие). Однако при шлифовании в системе координат, связанной с зоной контакта, температурное поле быстро (за доли секунды) достигает состояния теплового насыщения, т. е. перестает зависеть от времени и становится стационарным.

2. Поверхностный слой шлифуемой детали нагревается на небольшую глубину. Поэтому обрабатываемые образцы считаем полубесконечными телами.

3. При шлифовании без охлаждения пренебрегаем теплообменом с воздухом и считаем поверхность теплоизолированной.

4. Источник тепла представляем в виде бесконечно длинной полосы. Это допустимо, так как безразмерная длина теплового источника при заточке пластин с высотой шлифуемой поверхности 7 мм больше 5, т. е.  $L = Vl/(2a) > 5$ , где  $l$  — размерная длина теплового источника, равная ширине круга  $h_k$ , мм.

5. Движение источника тепла по поверхности изделия предполагаем однократным.

6. Плотность теплового потока определяем экспериментально по измерению тангенциальной составляющей силы резания [15]. Мощность тепловыделения рассчитаем по формуле

$$N = P_z V_k / 0,427,$$

где  $V_k$  — скорость круга, м/с;  $P_z$  — тангенциальная составляющая силы резания, Н; 0,427 — механический эквивалент теплоты.

Разделив величину  $N$  на площадь  $S_k$  зоны контакта, определим полную плотность теплового потока по формуле

$$q_n = P_z V_k / (0,427 S_k), \quad (6)$$

где  $S_k = h_k B$  — площадь, определяемая как произведение ширины  $h_k$  круга на высоту  $B$  детали, см<sup>2</sup>.

Рассмотрим пример расчета температурного поля на поверхности образца из стали P18 ( $a = 0,057$  см<sup>2</sup>/с,  $\lambda = 0,65$  кал/(см · с · град) с высотой шлифуемой поверхности  $B = 7$  мм. Обработку производили чашечным эльборовым кругом обычного качества (марки ЛО), зернистостью 8, твердостью керамической связки С1, концентрации зерен эльбора 100 % на керамической связке С10 с шириной ре-

жущей поверхности  $h_k = 10$  мм. Режим заточки: скорость круга 19 м/с, продольная подача 1 м/мин (или 1,67 см/с), поперечная подача 0,02 мм/дв. ход. В нашем случае продольная подача будет скоростью  $V$  источника тепла.

В условиях заточки ширина источника равна ширине режущей части круга, т. е.  $h_k = 10$  мм = 1 см. Тогда безразмерную полуширину контакта рассчитаем по формуле

$$H = \frac{V h_k}{2a} = \frac{1,67 \cdot 1}{2 \cdot 0,057} = 15.$$

Сначала построим температурные кривые в безразмерном виде согласно интегралу в формуле (5). Затем, умножив полученные данные из таблицы Приложения 1 [13] на размерный комплекс  $qa/(\pi\lambda V)$  перед интегралом, определим температуру  $T$ , °С.

Задавая разные значения  $Z = Vz/(2a)$ , определим безразмерную температуру  $\theta$  и построим безразмерное температурное поле на поверхности образца, т. е. при  $X = 0$ . Результаты расчета приведены на рис. 1. Видно, что максимум температуры смещен назад относительно движения источника тепла и для данного режима шлифования находится почти на задней его кромке. Смещение максимума температуры определяется относительной полушириной  $H$  источника тепла. Если  $H = Vh/(2a) \geq 5$ , как в нашем случае, то можно считать, что максимум температуры практически находится на задней кромке источника тепла. После прохождения источника тепла безразмерная температура  $\theta$  на поверхности образца снижается и при достаточно большом удалении ( $Z \rightarrow \infty$ ) стремится к определенной величине (в нашем случае к 3).

Отметим, что безразмерное температурное поле при шлифовании смазанными эльборовыми кругами рассчитывали из условия отсутствия тепло-

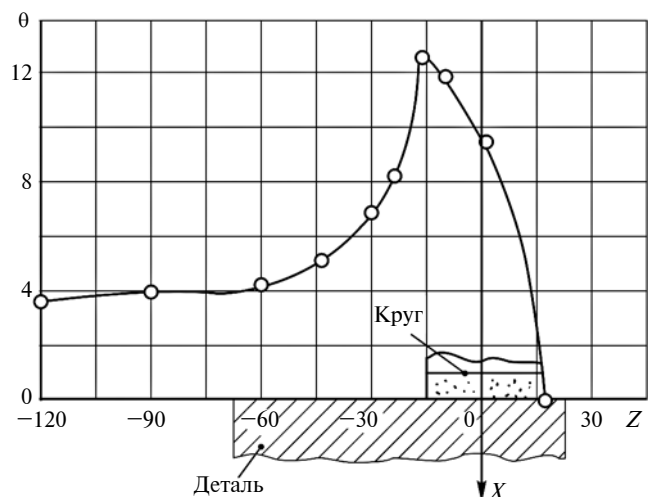


Рис. 1. Безразмерное температурное поле на поверхности стали P18:

$V = 19$  м/с;  $S = 1$  м/мин;  $t = 0,02$  мм/дв. ход

обмена с наружной средой. При этом условии безразмерное температурное поле для шлифования с ТСМ будет таким же, как при обработке без охлаждения.

Экспериментальные данные, полученные при остывании шлифованной поверхности стали Р18 после обработки с ТСМ и без него, подтверждают правильность принятых ограничений (рис. 2). Остывание шлифованной поверхности подчиняется экспоненциальному закону и описывается уравнениями:  $T = 199e^{-0,02r}$  с применением ТСМ и  $T' = 399e^{-0,02r'}$  без его применения. Степени в обоих приведенных формулах одинаковы, что свидетельствует об одинаковых закономерностях прохождения охлаждения, однако коэффициент пропорциональности указывает на различие значений температур при начале остывания, что также свидетельствует об уменьшении нагревания детали при нанесении твердой смазки.

Таким образом, смазочный материал, накапливающийся на боковых поверхностях образца, практически препятствует теплообмену с окружающей средой. В связи с этим принятое нами ограничение относительно отсутствия теплообмена с окружающей средой можно распространить на процесс шлифования смазанными кругами.

Температурные кривые целесообразно построить в безразмерном виде, т. е. сначала построить распределение температуры в соответствии с интегралом (5), а затем полученное распределение умножить на размерный множитель  $qa/(\pi\lambda V)$ , стоящий перед интегралом и определенный для шлифования с ТСМ и без ТСМ. Для построения безразмерного поля на поверхности стали последовательно назначаем различные значения параметра  $Z$  и по таблице Приложения 1 [13] получаем график зависимости безразмерной температуры от безразмерной величины  $Z$  (см. рис 1). Все поле имеет вид, характерный для шлифования. Максимум температуры смещен назад по ходу источника тепла и для данного режима находится почти на задней кромке источника. После построения безразмерного температурного поля переходим к размерным температурам и координате  $z$ , для чего выбранные значения на графике, определяющие интересующие нас точки координаты  $z$ , умножаем на размерный множитель, который вычисляется для шлифования как с применением ТСМ ( $\theta$ ), так и без его применения ( $\theta'$ ):

$$\theta = \frac{2qa}{\pi\lambda V} = \frac{2 \cdot 64 \cdot 0,057}{3,14 \cdot 0,065 \cdot 1,67} = 21,3 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta' = \frac{2q'a}{\pi\lambda V} = \frac{2 \cdot 95 \cdot 0,057}{3,14 \cdot 0,065 \cdot 1,67} = 31,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Умножив выбранные коэффициенты из таблицы Приложения 1 [13] для принятых нами координат

$T, ^\circ\text{C}$

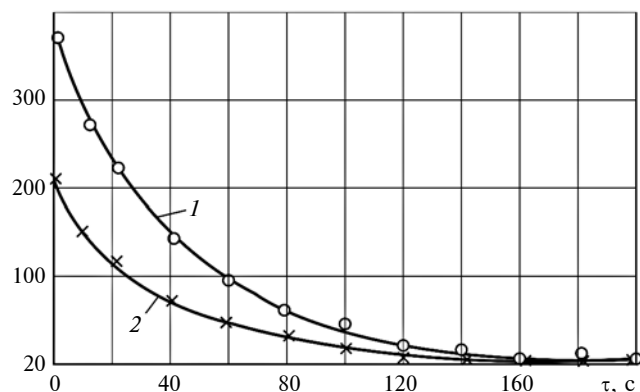


Рис. 2. Изменение температуры при остывании поверхности стали Р18 при шлифовании эльборовыми кругами разной твердости без ТСМ (1) и с ТСМ (2):

$V = 19 \text{ м/с}; S = 1 \text{ м/мин}; t = 0,02 \text{ мм/дв. ход}$

$T, ^\circ\text{C}$

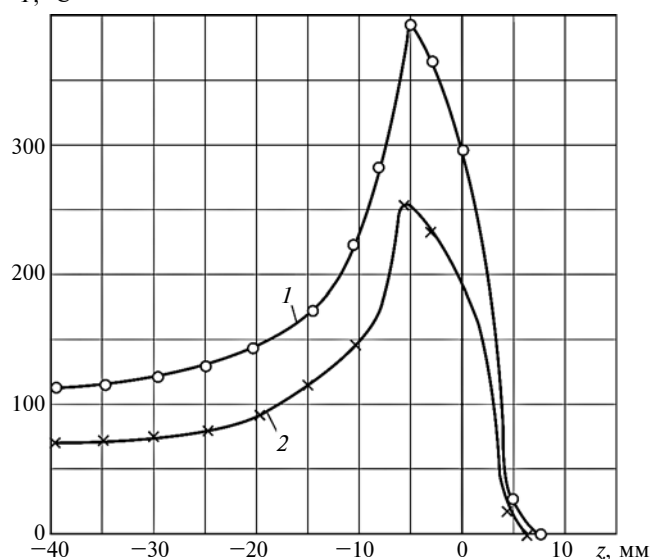


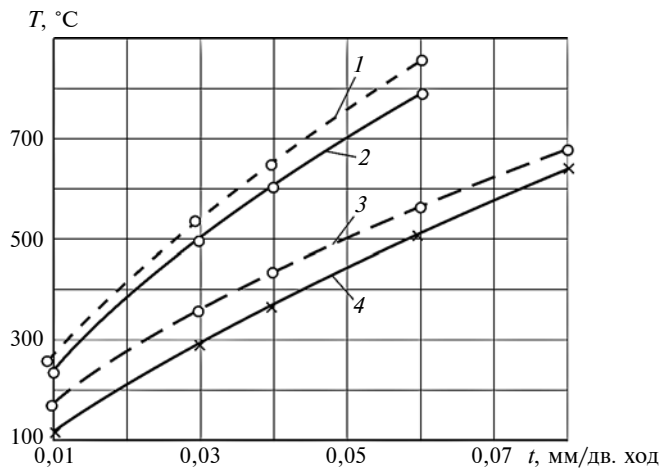
Рис. 3. Температурное поле при шлифовании стали Р18 без ТСМ (1) и с ТСМ (2):

$V = 19 \text{ м/с}; S = 1 \text{ м/мин}; t = 0,02 \text{ мм/дв. ход}$

нат  $Z$  (см. сетку координат на рис. 1) на значения безразмерной температуры  $\theta$  и  $\theta'$ , получим температурное поле, приведенное на рис. 3. Видно, что при данном режиме резания рассчитанная максимальная температура при шлифовании с ТСМ равна  $264 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а без ТСМ —  $410 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Смазывание эльборового круга также значительно снижает температуру в любой точке шлифованной поверхности. Такое снижение температуры (в 1,5 раза) достигается уменьшением плотности теплового потока с 95 до  $64 \text{ кал}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ :

$$q = \frac{1 \cdot 19}{0,427 \cdot 0,7} = 64 \text{ кал}/(\text{с} \cdot \text{см}^2);$$

$$q' = \frac{1,5 \cdot 19}{0,427 \cdot 0,7} = 95 \text{ кал}/(\text{с} \cdot \text{см}^2).$$



**Рис. 4.** Изменение температуры при шлифовании стали P18 с разной поперечной подачей без TCM (1 и 3) и с TCM (2 и 4): 1 и 3 — максимальная расчетная температура на поверхности детали; 2 и 4 — измеренная контактная температура;  $V = 19$  м/с;  $S = 1$  м/мин

Аналогичное расчетное температурное поле получили при шлифовании с разными поперечными подачами (рис. 4). Здесь же приведены экспериментально полученные значения контактной температуры. Видно, что расчетные значения несколько больше экспериментальных. При шлифовании без TCM эта разница не превышает 8 %, при шлифовании с TCM достигает 30 %. Это объясняется расплавлением смазочного материала под воздействием высоких температур, что сопровождается поглощением некоторой части тепла из зоны резания.

Таким образом, проведенный термодинамический анализ показал, что введение смазки в поры круга значительно снижает температуру в зоне обработки.

1. При нанесении предложенной композиции TCM на режущую поверхность эльборового круга температура в зоне контакта с поверхностью детали при шлифовании на разных режимах резания уменьшается в 1,5–2 раза.

2. На основании аналитического описания теплового режима шлифования установлено, что контактная температура на поверхности быстрорежущей стали при использовании TCM снижается в 1,5–2 раза в результате уменьшения тепловой мощности, выделяющейся в зоне резания.

3. Часть (10÷20 %) выделенного в зоне резания тепла расходуется на расплавление стеарина, входящего в состав TCM. Перераспределение тепловых потоков в инструмент и обрабатываемую деталь при смазывании эльборового круга обусловлено изменением геометрии профиля его режущей поверхности. При шлифовании без TCM в эльборовый круг поступает 25 % выделенного в зоне резания тепла, а с TCM — 30 %.

1. **Прогрессивные** машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: Коллективная монография. Т. V. / А. С. Верещагин, А. П. Возняковский, Т. Ф. Григорьева и др. М.: ИД "Спектр", 2015. С. 228–264.

2. **Development** of digital machine-building production in the Industry 4.0 concept / V. A. Kholopov, E. N. Kashirskaya, A. P. Kushnir, E. V. Kurnasov, et. al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. V. 47. N. 4. P. 380–385. DOI: 10.3103/S1052618818040064.

3. **Kopac J., Krajnik P.** High Performance Grinding // Journal of Materials Processing Technology. 2006. V. 175. N. 1. P. 278–284.

4. **Methodology** for assessing the implementation of the production process / E. N. Kashirskaya, E. V. Kurnasov, V. A. Kholopov, A. G. Shmeleva // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. IEEE, 2017. P. 232–235. DOI: 10.1109/CTSYS.2017.8109533.

5. **Панайоти В. А.** Исследование теплового режима при шлифовании с применением твердых смазок // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 6 (59). С. 32–38.

6. **Panaioti V. A., Asadova Y. S., Nemenko M. V.** Assessing the effectiveness of solid lubricants // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. N. 6. P. 493–497.

7. **Панайоти В. А.** Исследование структурных превращений в быстрорежущих сталях при шлифовании с применением твердых смазок // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 2. С. 55–60.

8. **Панайоти В. А.** Исследование влияния твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали при заточке // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 41–45.

9. **Oliveira J. F. G., et. al.** Industrial challenges in grinding // CIRP annals. 2009. V. 58. N. 2. P. 663–680.

10. **Panaioti V. A.** Applying solid lubricant to the grinding-wheel surface // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. N. 4. P. 359–362.

11. **Панайоти В. А.** Повышение эффективности и качества при шлифовании быстрорежущих сталей с использованием твердых смазок // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2 (316). С. 87–91.

12. **Панайоти В. А.** Исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании с твердой смазкой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 1 (315). С. 67–71.

13. **Сипайлов В. А.** Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.

14. **Dzhemesyuk I. A., Gorbunov S. G.** Mathematical modeling of the influence of relaxation processes on the temperature field in an elastic half-space // Russian technological journal. 2017. V. 5. N. 5. P. 40–50.

15. **Панайоти В. А.** Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей // Науч. тр. IV Междунар. науч. конф. "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". М.: Издательский дом "Спектр", 2015. С. 189–191.

16. **Панайоти В. А.** Оценка смазывающей способности TCM по составляющим силы шлифования // Материалы конференций ГНИИ "Нацразвитие". Май 2017: сборник статей. СПб.: ГНИИ "Нацразвитие", 2017. С. 19–27.



## Сравнение эффективности углеродных нанотрубок и графена как армирующей компоненты нанокompозитов

Исследована армирующая способность двух наиболее перспективных анизотропных нанонаполнителей (углеродных нанотрубок и графена) для создания конструкционных полимерных нанокompозитов высокого качества.

Использована обобщенная модель усиления нанокompозитов, учитывающая характеристики нанонаполнителя, матричного полимера и тип нанонаполнителя.

**Ключевые слова:** нанокompозит, углеродные нанотрубки, графен, усиление, молекулярные характеристики, структура, комплексная модель.

The reinforcing ability of the two most promising anisotropic nanofillers (carbon nanotubes and graphene) to create high-quality structural polymer nanocomposites is studied. A generalized model of reinforcement of nanocomposites was used, taking into account the characteristics of the nanofiller, matrix polymer, and the type of nanofiller.

**Keywords:** nanocomposite, carbon nanotubes, graphene, reinforcement, molecular characteristics, structure, complex model.

В настоящее время углеродные нанотрубки [1] и графены [2] считаются наиболее перспективными нанонаполнителями для полимерных нанокompозитов, что обусловлено исключительно высокими механическими характеристиками и большой анизотропией указанных нанонаполнителей. Эффективность углеродных нанотрубок и графена как армирующего элемента нанокompозитов сравнивается в работах [3–5]. Так, в работе [5] показано, что при прочих равных условиях нанокompозиты "эпоксиполимер — графен" имеют более высокий модуль упругости по сравнению с нанокompозитами "эпоксиполимер — углеродные нанотрубки". Аналогичный результат получен в работе [3] для нанокompозитов на основе полиэтилена высокой плотности. Различие объясняется линейным (одномерным или 1D-) контактом "полимерная матрица — углеродные нанотрубки" и двумерным (2D-) контактом в случае графена. Однако полимерные нанокompозиты представляют собой структурно сложные системы, свойства которых определяются как минимум свойствами нанонаполнителя и матричного полимера и уровнем межфазных взаимодействий (эффективность переноса приложенного к образцу нанокompозита механического напряжения от полимерной матрицы к нанонаполнителю) [6]. Кро-

ме того, хорошо известно [7, 8], что изначально одномерные (углеродные нанотрубки) и двумерные (графен) нанонаполнители существенно изменяют свою структуру в полимерной матрице нанокompозита, что может быть обусловлено как естественными причинами (взаимодействиями "полимер — нанонаполнитель"), так и искусственным воздействием (ультразвук, функционализация и т. п.). Поэтому целью настоящей работы стала аналитическая количественная трактовка армирующей (усиливающей) способности углеродных нанотрубок и графена в рамках комплексной модели [9].

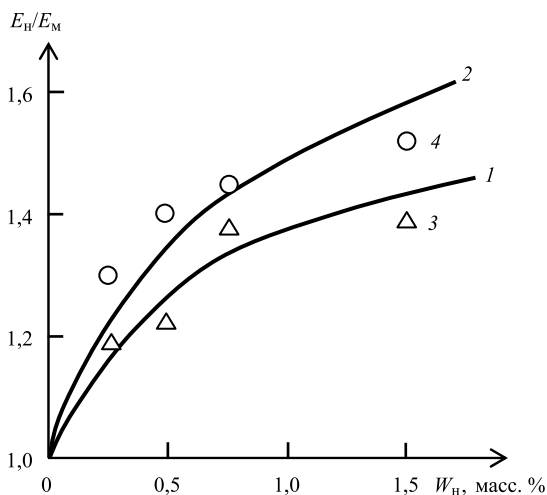
В качестве экспериментальной базы для теоретического анализа использовали данные работы [5] для нанокompозитов на основе эпоксидного полимера (ЭП) на базе диглицидилового эфира, отвержденного гексагидрофталевым ангидридом. В качестве нанонаполнителя использовали многослойные углеродные нанотрубки (УНТ) диаметром ~50 нм и длиной ~2000 нм, а также графен (Гр), полученный химическим окислением природного графита по методу Хаммера. Содержание УНТ и Гр в рассматриваемых нанокompозитах варьировалось в пределах 0,25÷1,50 масс. %. Испытания на одноосное растяжение выполнили на приборе Instron 88 215 при температуре 293 К и скорости деформации  $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  [5].

Для описания свойств полимерных нанокompозитов в работе [9] предложено следующее обобщенное уравнение

$$E_n/E_m = 1 + c D_n^m W_n^n l_{ст}, \quad (1)$$

где  $E_n$  и  $E_m$  — модули упругости соответственно нанокompозита и матричного полимера (отношение  $E_n/E_m$  принято называть степенью усиления нанокompозита);  $c$  — безразмерный коэффициент;  $m$  и  $n$  — показатели;  $D_n$  — базовый размер исходной наночастицы, нм;  $W_n$  — содержание нанонаполнителя, масс. %;  $l_{ст}$  — длина статистического сегмента цепи полимерной матрицы, нм, характеризующая ее свойства, а именно — гибкость.

Для каждого класса нанокompозитов значения  $c$ ,  $m$  и  $n$  являются константами и имеют следующие величины: для нанокompозитов "полимер — углеродные нанотрубки"  $c = 0,05$ ,  $m = 0,50$  и  $n = 0,25$ ; для нанокompозитов "полимер — графен" или в общем случае "полимер — 2D-нанонаполнитель"  $c = 0,32$ ,  $m = 0$  и  $n = 0,50$  [9].



Зависимости степени усиления  $E_H/E_M$  от массового содержания  $W_H$  нанонаполнителя, рассчитанные по уравнению (1) (1 и 2) и полученные экспериментально (3 и 4) для нанокompозитов ЭП–УНТ (1 и 3) и ЭП–Гр (2 и 4)

Длину  $l_{CT}$  статистического сегмента для полимерной матрицы нанокompозита определяли по формуле [6]

$$l_{CT} = l_0 C_\infty, \quad (2)$$

где  $l_0 = 0,147$  нм — длина скелетной связи основной цепи полимера [6];  $C_\infty$  — характеристическое отношение, являющееся показателем гибкости полимерной цепи, которое определяли по формуле [6]

$$C_\infty = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}. \quad (3)$$

Здесь  $d_f$  — фрактальная размерность структуры полимерного материала, для эпоксиполимеров равная  $2,80 \div 2,85$  [10];  $d$  — размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае  $d = 3$ ).

Согласно уравнениям (2) и (3) получили  $l_{CT} \approx 0,82 \div 1,13$  нм. Поэтому далее в качестве первого приближения использовали величину  $l_{CT} = 1$  нм.

Для сравнения на рисунке приведены рассчитанные при указанных выше параметрах по уравнению (1) и полученные экспериментально зависимости степени усиления  $E_H/E_M$  от содержания  $W_H$  нанонаполнителя для рассматриваемых нанокompозитов. Из сравнения следует, что для обеих серий нанокompозитов (ЭП–УНТ и ЭП–Гр) получено хорошее соответствие предложенной модели и экспериментальных результатов (их среднее расхождение составляет 4,3 %, что сравнимо с экспериментальной погрешностью определения параметра  $E_H/E_M$ ).

Далее рассмотрим особенности применения уравнения (1) для описания степени усиления полимерных нанокompозитов двух рассматриваемых классов.

Во-первых, в соотношениях подобного рода используется, как правило, объемное  $\varphi_H$ , а не массовое  $W_H$  содержание нанонаполнителя. Обычно при типичных для полимерных нанокompозитов малых содержаниях нанонаполнителя соотношение между  $\varphi_H$  и  $W_H$  определяется следующей формулой [6]

$$\varphi_H = W_H / \rho_H,$$

где  $\rho_H$  — плотность нанонаполнителя.

Если для графена плотность  $\rho_H = 1600$  кг/м<sup>3</sup> считается общепринятой [11], то для углеродных нанотрубок этот параметр выбирается достаточно произвольно и варьируется в довольно широком диапазоне — от 800 [12] до 2100 кг/м<sup>3</sup> [13], т. е. почти в 3 раза. Это приводит к значительной неопределенности и может изменить не только количественные, но и качественные результаты [14]. Использование массового содержания углеродных нанотрубок исключает эту неопределенность.

Во-вторых, важным аспектом является зависимость степени усиления  $E_H/E_M$  от диаметра  $D_H$  для углеродных нанотрубок и ее отсутствие для графена. Для 2D-нанонаполнителей (графен, органоглина, нитрид бора и т. п.) толщина одной пластины составляет  $\sim 1$  нм, и тогда для них  $D_H = 1$  нм. Коэффициент  $c$  для углеродных нанотрубок примерно в 6 раз меньше, чем для графена. Уравнять их возможности с учетом сказанного выше можно увеличением диаметра  $D_H$  углеродных нанотрубок. Так, при  $W_H = 2$  масс. % такое равенство реализуется для трубок с  $D_H \approx 58$  нм, а при  $W_H = 5$  масс. % — с  $D_H \approx 91$  нм.

В-третьих, в уравнении (1) показатель содержания  $W_H$  нанонаполнителя  $n = 0,25$  для углеродных нанотрубок и  $n = 0,50$  — для 2D-нанонаполнителей, включая графен. Это различие обусловлено разными видами агрегации указанных нанонаполнителей — 2D-нанонаполнители формируют так называемые "пачки" или тактоиды, сохраняющие длину исходной пластины, а углеродные нанотрубки образуют кольцеобразные формирования, размер (радиус) которых снижается по мере увеличения содержания нанонаполнителя [15], что снижает эффективность углеродных нанотрубок быстрее, чем 2D-нанонаполнителей.

Отметим очень важный аспект: в уравнении (1) нет начальных модуля упругости и степени анизотропии нанонаполнителя, т. е. факторов, считающихся определяющими его высокую эффективность [1, 2]. Это еще раз подчеркивает, что полимерные нанокompозиты армируются (усиливаются) не исходными частицами нанонаполнителя, а их агрегатами [14].

Таким образом, результаты настоящей работы показали, что предложенная комплексная модель адекватно описывает различие эффективности углеродных нанотрубок и графена в качестве арми-

рующей (усиливающей) компоненты полимерных нанокомпозитов как качественно, так и количественно. Это различие обусловлено агрегацией нанонаполнителя, его содержанием, свойствами матричного полимера и т. п., что не позволяет сделать однозначный вывод относительно преимуществ того или иного нанонаполнителя. Увеличение диаметра углеродных нанотрубок может компенсировать преимущества графена как армирующей компоненты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Moniruzzaman M., Winey K. I.** Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes // *Macromolecules*. 2006. V. 39. N. 16. P. 5194–5205.
2. **Kim H., Abdala A. A., Macosko C. W.** Graphene/polymer nanocomposites // *Macromolecules*. 2010. V. 43. N. 16. P. 6515–6530.
3. **El Achaby M., Quais A.** Processing and properties of polyethylene reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes // *Materials and Design*. 2013. V. 44. N. 1. P. 81–89.
4. **Developing** polymer composite materials: carbon nanotubes or graphene? / X. Sun, H. Sun, H. Li a. a. // *Advanced Materials*. 2013. V. 25. N. 37. P. 5153–5177.
5. **Comparison** of filler percolation and mechanical properties in graphene and carbon nanotubes filled epoxy nanocomposites / M. Martin-Gallego, M. M. Bernal, M. Hernandez a. a. // *European Polymer Journal*. 2013. V. 49. N. 6. P. 1347–1353.
6. **Микитаев А. К., Козлов Г. В.** Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений. М.: Наука, 2009. 278 с.
7. **Микитаев А. К., Козлов Г. В.** Зависимость степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки от размерности нанонаполнителя // *Доклады РАН*. 2015. Т. 462. № 1. С. 41–44.
8. **Козлов Г. В., Долбин И. В.** Механизмы роста и структура кластеров 2D-нанонаполнителя в полимерных средах // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61. № 3. С. 178–181.
9. **Жирикова З. М., Козлов Г. В., Алоев В. З.** Нанокомпозит полимер/углеродные нанотрубки: прогнозирование степени усиления // *Наноиндустрия*. 2012. № 3. С. 38–41.
10. **Магомедов Г. М., Козлов Г. В.** Синтез, структура и свойства сетчатых полимеров и нанокомпозитов на их основе. М.: Изд-во "Академия Естественных наук", 2010. 464 с.
11. **Strong** and ductile poly(vinyl alcohol)/graphene oxide composite films with a layered structure / Y. Xu, W. Hong, H. Bai a.a. // *Carbon*. 2009. V. 47. N. 15. P. 3538–3543.
12. **Zhamu A.** Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: a review // *Journal of Materials Science*. 2008. V. 43. N. 15. P. 5092–5101.
13. **Deformation** — morphology correlations in electrically conductive carbon nanotube — thermoplastic polyurethane nanocomposites / H. Koerner, W. Liu, M. Alexander a. a. // *Polymer*. 2005. V. 46. N. 12. P. 4405–4420.
14. **Carbon** nanofibre reinforcement of soft materials / D. W. Schaefer, J. Zhao, H. Dowty a. a. // *Soft Matter*. 2008. V. 4. N. 10. P. 2071–2079.
15. **Микитаев А. К., Козлов Г. В.** Моделирование углеродных нанотрубок (нановолокон) как макромолекулярных клубков // *Известия вузов. Физика*. 2015. Т. 58. № 8. С. 3–7.

### Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5–2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

#### **К статье прилагаются:**

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1–3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).

УДК 621.91.02

Г. С. ЖЕЛЕЗНОВ, канд. техн. наук, С. Г. Андреева (Сызранский филиал СамГТУ), e-mail: zgs1931@mail.ru

## Определение отклонений размера и формы отверстий при развертывании

Получены зависимости для определения отклонений размера и формы обработанной поверхности при развертывании отверстий для оптимизации припуска с учетом начальных отклонений формы отверстия и входных параметров технологической системы.

**Ключевые слова:** отверстие, развертывание, разбивка, ось развертки, ось вращения, отклонение формы, прогнозирование, припуск, оптимизация.

Dependencies are obtained for determining of deviations in the size and shape of the machined surface when reaming holes to optimize the allowance taking into account the initial deviations of the hole shape and input parameters of the technological system.

**Keywords:** hole, reaming, breakdown, ream axis, rotation axis, shape deviation, forecasting, allowance, optimization.

При обработке деталей мерными режущими инструментами (зенкерами, развертками) размеры и формы отверстий определяются размерами и формами инструментов. Однако в результате разбивки или усадки, которые возникают при обработке, размеры обработанной поверхности имеют отклонения относительно параметров инструмента. При разбивке диаметр  $d$  обработанного отверстия больше диаметра  $D$  режущего инструмента, а при усадке меньше.

Усадка возникает из-за упругих напряжений в материале заготовки и может быть значительной только при обработке тонкостенных заготовок, если толщина стенки заготовки меньше  $d/6$  [1]. Чаще всего имеет место разбивка, поэтому влияние усадки учитывать не будем.

При проектировании развертывания отверстий необходимо прогнозирование величины и характера разбивки для правильного выбора параметров разверток и режима резания. При этом припуск на размер при развертывании должен быть минимальным и достаточным для обеспечения точности обработанного отверстия.

Для обеспечения требуемой точности при развертывании получены зависимости, отражающие связи между показателями технологической системы (ТС) и параметрами точности обработанного отверстия. Они построены моделированием с уче-

том основных причин и механизмов образования отклонений размеров и форм обработанных отверстий.

Развертывание не выполняют на режимах, при которых могут возникнуть наростообразование и значительное тепловыделение. Выделяемая при обработке теплота не влияет на точность ввиду охлаждения инструмента и заготовки. Главной причиной разбивки является отклонение в процессе резания оси развертки от оси ее вращения, которое возникает из-за следующих факторов:

биения режущей части развертки и его распределения по лезвиям;

отклонения оси вращения развертки от оси обрабатываемого отверстия;

отклонения формы обрабатываемой поверхности;

отклонения от параллельности оси отверстия от оси вращения шпинделя станка;

неодинаковых износов разных лезвий развертки.

Эти факторы в совокупности определяют отклонение оси развертки в поперечном формообразующем сечении, проходящем через начало калибрующей части развертки, от оси ее вращения, при котором все действующие на развертку силы уравновешены. Сила резания в процессе развертывания зависит только от глубины резания и подачи на зуб, которые из-за биения режущей части разные для каждого лезвия развертки. Так как отклонение оси развертки от оси ее вращения, в отличие от подачи на зуб, измеряется в том же направлении, что и глубина резания, то глубина резания оказывает влияние на разбивку большее, чем подача. При этом из-за случайного характера распределения отклонений, определяющих биение режущей части развертки, распределение подач для разных лезвий развертки имеет случайный характер.

Математическая модель для определения разбивки [2] основывается на системе уравнений равновесия системы поперечных сил в формообразующем сечении развертки для установившегося режима резания, при котором глубина резания для разных лезвий выражается через перемещения оси развертки в направлениях осей выбранной системы координат в зависимости от ее угла поворота при резании, изменяющегося от 0 до  $2\pi$ . Из этой

системы уравнений получены аналитические зависимости для определения поперечных перемещений  $f_x$  и  $f_y$  оси развертки по осям плоской системы координат, расположенной в поперечном сечении развертки:

$$f_x = \frac{\frac{(M + P_y)(A + Be)}{D} - U - He}{\frac{(M + P_y)(B + P_x)}{D} - H}; \quad (1)$$

$$f_y = \frac{A + Be - f_x(B - P_x)}{D}. \quad (2)$$

Здесь

$$A = t \left( \sum_{i=1}^z S_i \sin \varphi - m \sum_{i=1}^z S_i \cos \varphi_i \right); \quad (3)$$

$$B = \sum_{i=1}^z S_i \sin \varphi \cos \varphi - m \sum_{i=1}^z S_i \cos^2 \varphi_i; \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^z S_i \sin^2 \varphi_i - m \sum_{i=1}^z S_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i; \quad (5)$$

$$H = \sum_{i=1}^z S_i \cos^2 \varphi_i + m \sum_{i=1}^z S_i \sin \varphi_i \cos \varphi_i; \quad (6)$$

$$M = \sum_{i=1}^z S_i \sin \varphi_i \cos \varphi_i + m \sum_{i=1}^z S_i \sin^2 \varphi_i; \quad (7)$$

$$U = t \left( \sum_{i=1}^z S_i \cos \varphi_i + m \sum_{i=1}^z S_i \sin \varphi_i \right); \quad (8)$$

$$m = \frac{k_1}{k} \cos F; \quad P_x = \frac{G_x}{k\tau}; \quad P_y = \frac{G_y}{k\tau}, \quad (9)$$

где  $\tau$  — касательное напряжение в плоскости сдвига зоны стружкообразования;  $k = 4$ ;  $k_1 = 3$ ;  $F$  — угол в плане режущей части развертки;  $i$  — номер лезвия развертки, отсчитываемый против вращения от оси абсцисс, проходящей через оси обрабатываемого отверстия и развертки в формообразующем сечении;  $z$  — число лезвий;  $e$  — отклонение оси развертки перед обработкой от оси обрабатываемого отверстия в поперечном сечении;  $\varphi_i$  — угол поворота  $i$ -го лезвия;  $S_i$  — подача на зуб для  $i$ -го лезвия;  $t$  — номинальная глубина резания;  $G_x$  и  $G_y$  — жесткости технологической системы (ТС) по осям  $x$  и  $y$ .

Вышеуказанные величины являются входными элементами ТС. Подачу на зуб определяют методом, который приведен в работе [3], с учетом закона распределения по лезвиям параметров, определяющих биение режущей части развертки, которое определяет заточка. Износ режущего инструмента учитывается соответствующим увеличением подачи на зуб.

Для заданных входных элементов ТС зависимости (1) и (2) определяют перемещения центра формообразующего сечения для углов поворота развертки, задаваемых с некоторым шагом за один ее оборот, отсчитываемым от оси абсцисс системы координат, начало которой совпадает с исходным положением оси развертки в поперечном сечении, а ось абсцисс — с направлением отклонения осей вращения и обрабатываемого отверстия перед обработкой. Наибольшие разности перемещений по осям координат определяют разбивки по осям  $P_x$  и  $P_y$ , а их разность — отклонение  $EFK$  от круглости:

$$P_x = f_{x \max} - f_{x \min};$$

$$P_y = f_{y \max} - f_{y \min};$$

$$EFK = P_x - P_y.$$

Практическое значение имеет определение допустимого отклонения от круглости обрабатываемого отверстия, так как оно непосредственно обуславливает изменение глубины резания для каждого зуба развертки по ходу ее вращения и приводит к возникновению разбивки и образованию отклонения от круглости.

Для оценки влияния отклонения от круглости обрабатываемого отверстия на разбивку принимаем, что форма его поперечного сечения — эллипс, а в выражениях (1)—(9) задаем номинальную глубину резания как функцию угла  $\varphi$  поворота инструмента, для  $i$ -го лезвия развертки в текущий момент времени угол  $\varphi_i$  поворота развертки (рис. 1).

Номинальная глубина резания при эллипсной форме профиля отверстия в поперечном сечении определяется выражением

$$t_i = t_0 + a - \frac{b}{\sqrt{\sin^2 \psi_i + \cos^2 \psi_i \frac{b^2}{a^2}}}. \quad (10)$$

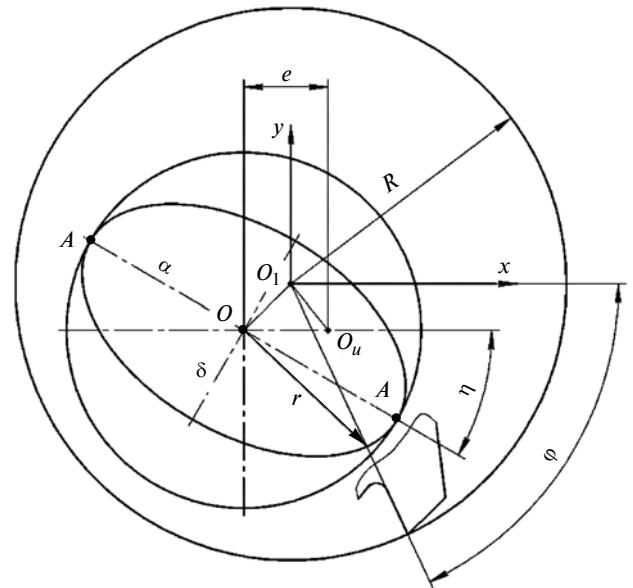


Рис. 1. Схема для определения глубины резания при профиле обрабатываемого отверстия в форме эллипса

Здесь  $\psi_i = \varphi_i - \eta$ , где  $\eta$  — угол между осью  $O_1X$  и большой осью эллипса;  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси эллипса;  $0 \leq \varphi_i \leq 2\pi$ .

Задавая угол  $\varphi_i$  с шагом  $\pi/8$ , по зависимостям (1)–(9) определяем экстремальные перемещения центра сечения развертки по осям  $X$  и  $Y$ :  $f_{x \max}$  и  $f_{x \min}$ ,  $f_{y \max}$  и  $f_{y \min}$ . Разбивка по оси  $X$  составит  $P_x = f_{x \max} - f_{x \min}$ , по оси  $Y$  составит  $P_y = f_{y \max} - f_{y \min}$ ; отклонение от круглости  $EFK = P_x - P_y$ .

В формуле (10) принимаем большую полуось  $a = 0,5d$ . Наибольшее отношение полуосей  $b/a$  определяет отклонение  $EFK$  от круглости обрабатываемого отверстия, наибольшее значение которого равно половине допуска на размер отверстия:  $EFK = 0,5T_N$ .

Допуск на обрабатываемое отверстие диаметром  $d$  по качеству  $N$  составит:

$$T_N = 10^{-2} 1,6^{N-6} (0,45\sqrt[3]{d} + 0,001d).$$

Для допустимой разности  $a - b = 0,5T_N$  получим:

$$\frac{b}{a} = 1 - \frac{0,5T_N}{a}; \quad a = 0,5d; \quad \frac{b}{a} = 1 - \frac{T_N}{d};$$

$$b = a - 0,5T_N.$$

Выражение (10) будет иметь вид:

$$t_i = t_0 + 0,5d - \frac{d - T_N}{2\sqrt{\sin^2 \psi_i + \left(1 - \frac{T_N}{d}\right)^2 \cos^2 \psi_i}}. \quad (11)$$

Так как наибольшее отклонение формы обрабатываемого отверстия равно половине допуска на диаметр, то по зависимостям (1)–(9), (11) установлено, что для обеспечения точности обработанного отверстия по седьмому качеству допуск на диаметр отверстия не должен быть больше пяти допусков обработанного отверстия, а качество не должен превышать качество обработанного отверстия больше чем на три единицы. При обработках на станках невысокой точности для обеспечения точности по седьмому качеству необходимо предварительное развертывание. В общем случае допуск на диаметр обрабатываемого отверстия не должен превышать пяти допусков на диаметр обработанного отверстия.

При проектировании развертывания в некоторых случаях необходимо учитывать влияние отклонения от параллельности осей отверстия и развертки, а также отклонения профиля продольного сечения обрабатываемого отверстия на точность обработанного отверстия. Так как из-за них возникает разбивка, и вследствие ее изменения по ходу подачи возникает отклонение профиля продольного сечения обработанного отверстия.

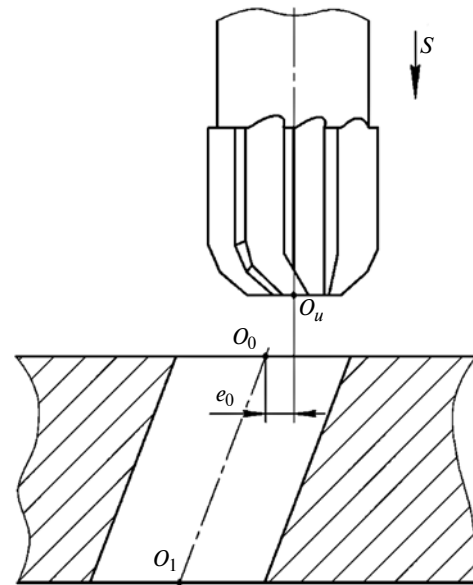


Рис. 2. Схема и параметры отклонения от параллельности оси развертки и оси обрабатываемого отверстия

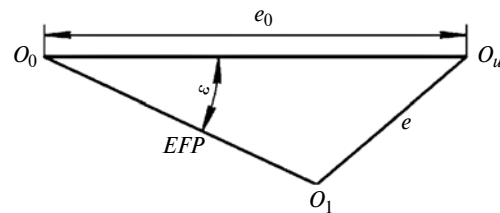


Рис. 3. Схема для определения текущего отклонения осей в формующем сечении развертки в направлении подачи

На рис. 2 показана схема отклонения от параллельности оси развертки и оси обрабатываемого отверстия, которое возникает, если заготовку устанавливают и закрепляют на станке непосредственно перед развертыванием. При резании это приводит к отклонению оси развертки от оси обрабатываемого отверстия в направлении подачи. Оси могут не находиться в одной плоскости. Ось обрабатываемого отверстия может перекрещиваться с осью вращения развертки.

На рис. 3 показана схема расположения центров поперечных сечений обрабатываемого отверстия и развертки в формующем сечении в начале обработки отверстия и при ее окончании. В начале обработки ось обрабатываемого отверстия проходит через точку  $O_0$ , а ось обрабатываемого отверстия — через точку  $O_u$ . Центр формующего сечения развертки в направлении подачи практически не меняет своего положения, а центр текущего поперечного сечения обрабатываемого отверстия смещается по прямой  $O_0O_1$ , расстояние между осями изменяется от  $e_0$  (начало обработки) до  $e$  (окончание), что приводит к изменению разбивки в направлении подачи и отклонению профиля продольного сечения отверстия.

Для определения отклонения  $k$  от параллельности оси обрабатываемого отверстия относительно оси развертки (в радианах) и угла  $\varepsilon$  между направлением исходного отклонения осей и проекцией оси обрабатываемого отверстия на плоскость, перпендикулярную оси развертки, в зависимостях (1)–(9) для трех положений развертки ( $l = 0$ ;  $l = 0,5l_0$ ;  $z = l_0$ ) относительно оси отверстия длиной  $l_0$  необходимо задать отклонение  $e$  осей, определяемое выражением

$$e = \sqrt{e_0^2 + (kl)^2 - 2e_0kl\cos\varepsilon}, \quad (12)$$

где  $e_0$  — отклонение осей перед обработкой;  $l$  — заход развертки в обрабатываемое отверстие в направлении подачи.

Угол  $\varepsilon$  определяет разные отклонения от параллельности (рис. 4). При  $\varepsilon = 0$  и  $180^\circ$  возникает отклонение от параллельности осей в общей плоскости, при  $\varepsilon = 90$  и  $270^\circ$  возникает перекося осей; при других значениях угла  $\varepsilon$  имеют место обе составляющие отклонения от параллельности.

Для трех вышеуказанных значений  $z$  по зависимостям (1)–(9), (12) определяем разбивку. Разность

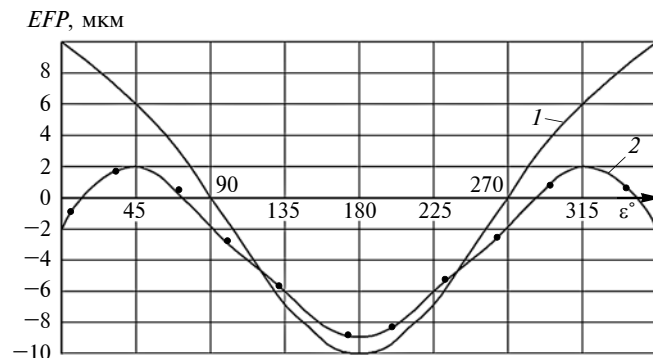


Рис. 4. Влияние угла  $\varepsilon$  на отклонение  $EFP$  от круглости для  $k = 0,04$  (1) и  $0,02$  (2) при  $G = 300$  Н/мм;  $\sigma_B = 600$  Н/мм<sup>2</sup>;  $d = 20$  мм;  $z = 8$ ;  $t_0 = 0,2$  мм;  $S_z = 0,1$  мм;  $l = 20$  мм;  $\delta_N = 0,021$  мм;  $\varphi = 15^\circ$ ;  $e = 0,4$  мм

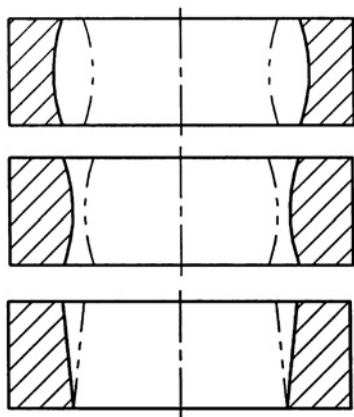


Рис. 5. Профили отверстий в продольных сечениях до обработки (— · —) и после обработки (сплошные линии)

Отклонения обработанных отверстий в зависимости от параметра  $k$  и начального отклонения отверстия

Начальное отклонение обрабатываемого отверстия	$z/l$			Отклонение обработанного отверстия
	0	0,5	1	
Обратная конусообразность	1	0,5	0	Прямая конусообразность
Прямая конусообразность	0	0,5	1	Обратная конусообразность
Седлообразность	0	1	0	Бочкообразность
Бочкообразность	1	0	1	Седлообразность

наибольшего и наименьшего значений — отклонение профиля продольного сечения. Аналогично можно установить влияние на разбивку и отклонения профиля продольного сечения величин  $\varepsilon$  и  $k$  и определить допустимое отклонение от параллельности и ее вид. Последнее необходимо для обеспечения рационального расположения обрабатываемой заготовки на станке.

Другой причиной образования отклонения профиля продольного сечения может быть отклонение профиля продольного сечения обрабатываемого отверстия, которое приводит к изменению глубины резания в направлении подачи. Если допуск профиля продольного сечения не задан, то его допустимое отклонение равно половине допуска на размер обрабатываемого отверстия. Предельное отклонение профиля продольного сечения определяет наибольшее возможное изменение глубины резания при обработке отверстия в направлении подачи, которое определяется формулой

$$\Delta t = 0,005 \cdot 1,6^{N-6} (0,45d^{0,333} + 0,001d). \quad (13)$$

Глубина резания может изменяться от 0 до  $\Delta t$ . Возможны следующие отклонения профиля продольного сечения обрабатываемого отверстия: конусообразность, бочкообразность и седлообразность. Зависимость изменения глубины  $t$  резания от захода  $l$  развертки в обрабатываемое отверстие определяет параметр  $k = l/l_0$ :

$$t = t_0 + k\Delta t. \quad (14)$$

Расчеты по формулам (1)–(9), (13), (14) показали (таблица), что седлообразность профиля обрабатываемого отверстия приводит к бочкообразности профиля обработанного отверстия, а бочкообразность создает седлообразность, обратная конусность обрабатываемого отверстия приводит к прямой конусности обработанного отверстия (рис. 5).

Таким образом, при назначении припуска для развертывания необходимо учитывать в каждом конкретном случае все отклонения формы и расположения обрабатываемого отверстия.

Полученные зависимости позволяют при проектировании технологического процесса обработки

С. Н. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук (МГТУ "СТАНКИН"), А. С. СЕЛИВАНОВ, И. Н. БОБРОВСКИЙ, кандидаты технических наук (Тольяттинский ГУ), Н. В. КАНАТНИКОВ, канд. техн. наук А. С. ПАШМЕНТОВА, (Орловский ГУ им. И. С. Тургенева), e-mail: bobri@yandex.ru

## Исследование влияния конструкции режущей части инструмента на силу резания при обработке колес с неэвольвентным профилем зубьев<sup>1</sup>

Исследованы силы резания при обработке зубчатых колес с неэвольвентным профилем зубьев на примере треугольного профиля зубьев с использованием робастного планирования эксперимента и дисперсионного анализа. Установлено, что на силу резания максимальное влияние оказывает радиус скругления вершины резца.

**Ключевые слова:** обработка резанием, неэвольвентный профиль зуба, сила резания, режущий инструмент, углы резания, радиус скругления.

The cutting forces are studied at machining of gear wheels with a non-involute tooth profile on the example of a triangular tooth profile using robust experimental design and analysis of variance. It is determined, that the cutting force is maximally influenced by the rounding radius of the cutter tip.

**Keywords:** cutting treatment, non-involute tooth profile, cutting force, cutting tool, cutting angles, rounding radius.

Неэвольвентные профили зубьев широко применяются в современных зубчатых передачах и соединениях механизмов буровых установок, дорожно-строительных машин, авиационной техники и др. Наиболее активно используются циклоидальные, треугольные, трапецеидальные и другие профили, что обусловлено, во-первых, конструктивным на-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-38-00037\18 мол\_а.

значением механизма, во-вторых, определенными преимуществами каждого из этих профилей по сравнению со стандартными.

Известны несколько способов обработки зубьев зацеплений и соединений с периодическим неэвольвентным профилем. Однако в современных экономических условиях, когда тип производства редко превышает среднесерийный, а в основном является единичным и мелкосерийным, наиболее эффективным является зубодолбление [1].

Профиль зубьев неэвольвентных зубчатых колес оптимизируется с целью обеспечения требуемых эксплуатационных свойств. Для нарезания таких зубчатых колес необходимо зуборезные долбяки специально проектировать и изготавливать для каждой новой зубчатой пары с учетом ее конструктивных особенностей. Поэтому особенно актуален рациональный подбор регулируемых конструкторско-технологических параметров резания, сочетание которых позволит обеспечить требуемую точность и качество обрабатываемой поверхности, а также стойкость инструмента. Учет силы резания необходим, так как от ее абсолютного значения и амплитуды изменения зависят качество обработки и интенсивность изнашивания инструмента. Априорная информация о количественном влиянии конструкции лезвия на силу резания при проектировании специального зуборезного инструмента обеспечит требуемые параметры технологического процесса.

Цель данной работы — установить влияние переднего и заднего углов резания, а также радиуса



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 76)

отверстий развертыванием учитывать отклонения входных параметров ТС и оптимизировать параметры развертки и режим резания с использованием информационных технологий для обеспечения точности обработанных поверхностей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Железнов Г. С., Андреева С. Г. Влияние упругой отдачи на отклонения размера и формы отверстий при

развертывании в тонкостенных заготовках // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 94—97.

2. Железнов Г. С., Железнова С. Г., Круцило В. Г. Влияние отклонения оси развертки от оси обрабатываемого отверстия на точность обработанного отверстия // СТИН. 2009. № 5. С. 32—36.

3. Железнов Г. С., Андреева С. Г. Распределение отклонений по режущим кромкам развертки, создающие биение режущей части, и влияние их на отклонения размера и формы обработанной поверхности // Вестник машиностроения. 2015. № 10. С. 70—74.



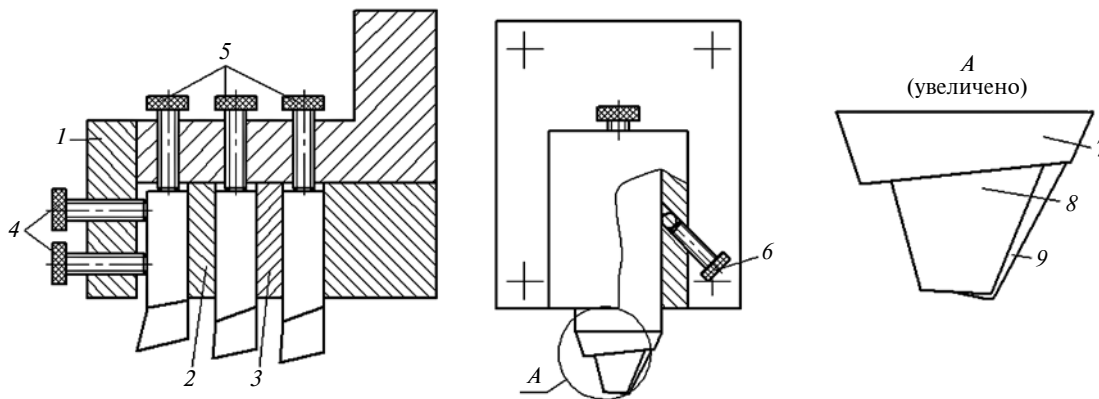


Рис. 1. Схема специальной резцовой головки

закругления вершины резца на максимальную силу резания, возникающую при механической обработке неэвольвентных зубчатых колес. Полученные результаты позволяют рекомендовать рациональные углы заточки передней и задней поверхностей инструмента и радиус закругления вершины резца.

Для обработки и анализа результатов исследований использовали методику робастного планирования эксперимента. Исследования [2–5] показали, что данная методика позволяет значительно упростить определение оптимальных параметров резания при механической обработке. Ключевой принцип данной методики заключается в том, что необходимо минимизировать изменения факторов шума (факторов, которые не контролируются оператором) и максимизировать при этом изменения управляющих факторов (факторов, которые устанавливает оператор). Качество обработки повышается при достижении наилучших значений управляющих факторов, т. е. при максимальном соотношении сигнал/шум (С/Ш).

Исследования силы резания при обработке зубчатых колес неэвольвентного профиля на зубодолбежных станках связаны с рядом трудностей: во-первых, высокая стоимость экспериментальных исследований, обусловленная изготовлением специального инструмента, а также заготовки зубчатых колес; во-вторых, сложность выделения силы резания одного наиболее нагруженного зуба, так как в процессе зубодолбления участвуют одновременно несколько зубьев.

С целью преодоления указанных затруднений исследования проводили с использованием специальной резцовой головки (рис. 1), что позволило отдельно смоделировать искомый, наиболее нагруженный рез без необходимости изготовления специального инструмента. Резцовая головка состоит из корпуса 1, в котором закреплены резцы 7, 8 и 9 и проставки 2 и 3. Точность расположения режущих лезвий относительно оси головки обеспечивается перемещением резцов с помощью винтов 5 и 6 в нужном направлении. Резцы закрепляются в кор-

пусе винтами 4. Взаимное положение режущих лезвий зуба при резании воспроизводится с помощью резцов 7–9. Резец 7 ограничивает длины режущих лезвий головки в соответствии с моделируемым резом. Резец 8 обеспечивает определенную геометрию слоя металла, срезаемого резцом 9, который моделирует исследуемый рез и затачивается соответствующим образом.

Эксперимент осуществляли на поперечно-строгальном станке ГД-320. Мгновенные значения осевых составляющих силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600. Показания прибора регистрировались персональным компьютером с использованием программного обеспечения LabView. Данный динамометр фиксирует три осевые составляющие силы резания. Используемую в дальнейшем максимальную силу резания определяли по формуле

$$P_{\max} = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2}.$$

Для моделирования выбрали обработку зубчатых колес с треугольным профилем, который конструктивно близок другим распространенным неэвольвентным профилям (трапецеидальным и храповым), а отличается величиной профильного угла. Схема исследуемого реза приведена на рис. 2, а рез характеризуется следующими геометрическими параметрами: толщина стружки, снимаемой боковой режущей кромкой,  $b_1 = 0,04$  мм, а вершиной кромки —  $b_2 = 0,06$  мм; длина стружки, снимаемой боковой кромкой,  $a_1 = 2,9$  мм, а вершиной кромки —  $a_2 = 0,4$  мм; угол профиля резца  $20^\circ$ ; скорость резания  $V = 20$  м/мин; материал инструмента — сталь Р6М5, заготовки — сталь 45.

Провели девять экспериментов с разными сочетаниями переднего  $\gamma$  и заднего  $\alpha$  углов резания и радиуса  $r_0$  закругления вершины резца. Приняли: угол  $\gamma = 2, 5$  и  $8^\circ$ , угол  $\alpha = 5, 10$  и  $15^\circ$ , радиус  $r_0 = 0,1, 0,15$  и  $0,2$  мм. Каждый эксперимент проводили 3 раза, за результат принимали среднеарифметическое значение. При проектировании эксперимента в

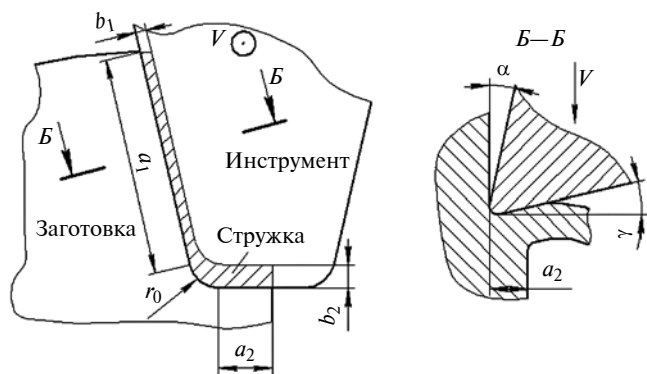


Рис. 2. Расчетная схема для экспериментального моделирования

соответствии с методикой робастного планирования выбрали три уровня (1, 2 и 3) геометрических параметров режущего инструмента, которые обозначили соответственно:  $A$  — передний угол  $\gamma$ ;  $B$  — задний угол  $\alpha$ ;  $C$  — радиус  $r_0$  вершины реза (табл. 1).

В экспериментах использовали ортогональный массив  $L9$  с четырьмя столбцами и девятью строками. Массив имеет восемь степеней свободы и может быть использован при эксперименте с тремя независимыми параметрами. Каждому геометрическому параметру присваивается столбец и доступны девять комбинаций геометрических параметров. План эксперимента с использованием ортогонального массива  $L9$  (табл. 2) имеет четыре столбца, один столбец массива остается пустым [6].

В табл. 3 приведены результаты экспериментального исследования силы резания и расчетные отношения  $C/Ш$ , определенные по формуле [7]

$$C/Ш = -10 \lg \left( \frac{1}{n} y_i^2 \right), \quad (1)$$

где  $n$  — число наблюдений;  $y$  — значение исследуемого параметра.

Среднее значение отношения  $C/Ш$  рассчитали для угла  $\gamma$  на уровнях 1, 2 и 3 путем усреднения отношения  $C/Ш$  для экспериментов соответственно 1—3, 4—6 и 7—9. Аналогично рассчитали средние значения отношений  $C/Ш$  для угла  $\alpha$  и радиуса  $r_0$  закругления (табл. 4). На рис. 3 приведены зависимости изменения среднего отношения  $C/Ш$  от геометрических параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$  режущего инструмента, используемого в эксперименте. Максимальное среднее отношение  $C/Ш$  соответствует лучшему сочетанию исследуемых параметров. Видно, что сочетание  $A3B3C1$  (максимальные значения углов  $\gamma$  и  $\alpha$  резания и минимальное значение радиуса  $r_0$ ) является оптимальным из условия максимального уменьшения силы резания.

После выбора оптимального сочетания конструктивных параметров следующий этап — прогнозирование силы резания и экспериментальная про-

верка прогнозного значения, которое рассчитывается по формуле

$$C/Ш_{\text{ср.опт}} = \quad (2)$$

$$= C/Ш_{\text{ср}} + \sum_{i=1}^n (C/Ш_{i\text{ср}} - C/Ш_{\text{ср}}), \quad (3)$$

где  $C/Ш_{\text{ср.опт}}$  — среднее оптимальное значение отношения;  $C/Ш_{\text{ср}}$  — общее среднее отношение;  $n$  — число проектных параметров, влияющих на качество.

Таблица 1

Геометрические параметры инструмента и их уровни

Обозначение	Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
$A$	Передний угол $\gamma^\circ$	2	5	8
$B$	Задний угол $\alpha^\circ$	5	10	15
$C$	Радиус закругления $r_0$ , мм	0,1	0,15	0,2

Таблица 2

План экспериментальных исследований

Номер эксперимента	$A$ , передний угол $\gamma^\circ$	$B$ , задний угол $\alpha^\circ$	$C$ , радиус $r_0$ закругления, мм	$D$ , ошибка
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	1	3	3	
4	2	1	2	
5	2	2	3	
6	2	3	1	
7	3	1	3	
8	3	2	1	
9	3	3	2	

Таблица 3

Результаты эксперимента по определению максимальной силы резания и расчету отношения  $C/Ш$

Номер эксперимента	$A$ , угол $\gamma^\circ$	$B$ , угол $\alpha^\circ$	$C$ , радиус $r_0$ , мм	Сила резания, Н	Отношение $C/Ш$
1	2	5	0,1	748,0	-57,48
2	2	10	0,15	775,5	-57,79
3	2	15	0,2	786,5	-57,91
4	5	5	0,15	726,0	-57,22
5	5	10	0,2	808,5	-58,15
6	5	15	0,1	710,6	-57,03
7	8	5	0,2	774,4	-57,78
8	8	10	0,1	671,0	-56,53
9	8	15	0,15	742,5	-57,41

Таблица 4

Среднее значение отношения  $C/Ш$  для уровней

Обозначение	Параметр	Уровень 1 (min)	Уровень 2	Уровень 3 (max)	Разность max - min
$A$	Угол $\gamma$	-57,73	-57,47	-57,24	0,49
$B$	Угол $\alpha$	-57,49	-57,49	-57,45	0,04
$C$	Радиус $r_0$	-57,01	-57,47	-57,95	0,94

Результаты дисперсионного анализа

Обозначение	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Критерий Шифера, $F$	Доверие, %	Вклад, %
<i>A</i>	0,3558	1	0,35582	5,3703	93,17	20,54
<i>B</i>	0,0035	1	0,00349	0,0527	17,24	0,20
<i>C</i>	1,3068	1	1,30676	19,7223	99,32	75,43
Ошибка	0,3313	5	0,06626	1,0000	50,00	3,82
Итого	1,9974	8	1,73232	—	—	100

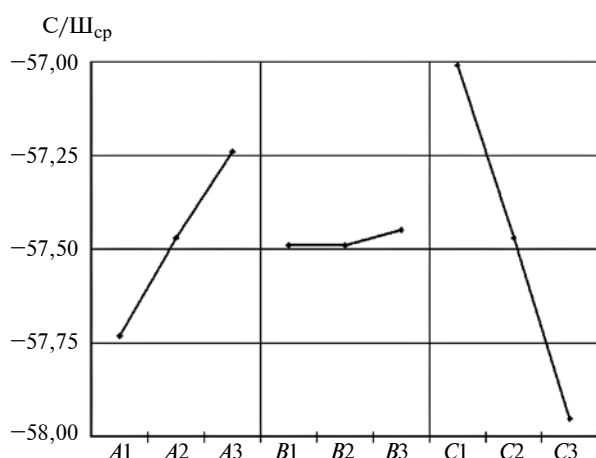
Сравнение прогнозируемой и полученной экспериментальным путем сил резания показало хорошее совпадение, отличие составило 1,8 %. Для сочетания *A3B3C1* прогнозируемая сила резания составила 688 Н, а экспериментальная 701 Н; прогнозируемое отношение *C/Ш* составило  $-56,75$ , а экспериментальное  $-56,91$ .

В табл. 5 приведены результаты дисперсионного анализа. "Доверие" более 90 % показывает, какой из исследуемых конструктивных параметров оказывает значительное влияние на силу резания. В исследуемом диапазоне параметров наибольшее влияние оказывает радиус закругления (75,43 %), меньшее (20,54 %) — передний угол резания, а задний угол резания не оказывает значимого влияния на силу резания. Результаты экспериментов показали: значительное влияние конструктивных параметров режущего лезвия на силу резания (разница между измеренными силами резания составила 15 %); сила резания от исследуемых параметров имеет линейную зависимость.

Связь силы резания с радиусом закругления вершины кромки выражается в том, что с увеличением радиуса увеличивается длина режущей кромки, участвующей в резании. Наибольшее влияние радиуса из всех рассмотренных факторов можно объяснить тем, что моделировали обработку зуба относительно небольшой высоты (3 мм), при увеличении высоты зуба влияние данного параметра будет уменьшаться.

Влияние переднего угла  $\gamma$  связано с тем, что при его увеличении упрощаются формирование и отвод стружки. Влияние данного параметра не зависит от высоты обрабатываемого зуба. Исследования показали, что увеличение угла  $\gamma$  на  $1^\circ$  уменьшает силу резания на 2,8 %.

Использование робастного планирования эксперимента обеспечивает простую, систематическую и эффективную методологию оптимизации параметров обработки. Отклонения между фактическим и прогнозируемым значением силы резания незна-

Рис. 3. Изменения среднего значения отношения *C/Ш*

чительно. Результаты исследования качественно согласуются с информацией, приведенной в работах [8, 9]. Применение современных методов планирования экспериментальных исследований позволило количественно уточнить имеющуюся информацию, касающуюся обработки нестандартных периодических профилей.

Основываясь на результатах работы, можно определить рациональные углы заточки передней и задней поверхностей инструмента, необходимые для обеспечения качества изделий. При выборе геометрических параметров инструмента из условия максимального снижения силы резания рекомендуется выбор максимально возможного переднего угла и минимального радиуса закругления вершины резца, значение заднего угла следует выбирать из условия работоспособности инструмента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ревенков А. А., Анисимов Р. В., Тарапанов А. С. Повышение эффективности эксплуатации долбяков для нарезания колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля // Известия Тульского ГУ. Технические науки. 2013. № 8. С. 136—142.
2. Abuelnaga A. M., El-Dardiry M. A. Optimization methods for metal cutting // International Journal of Machine Tool Design and Research. 1984. V. 24. N. 1. P. 11—18.
3. Bhatia S. M., Pandey P. C., Shan H. S. Thermal cracking of carbide tools during intermittent cutting // Wear. 1978. V. 51. N. 2. P. 201—211.
4. Grzesik W., Van Luttervelt C. A. Analytical models based on composite layer for computation of tool-chip interface temperatures in machining steels with multilayer coated cutting tools // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2005. V. 54. N. 1. P. 91—94.
5. Chandrasekaran H., Nagarajan R. On certain aspects of transient stresses in cutting tools // Journal of Engineering for Industry. 1980. V. 102. N. 2. P. 133—141.
6. Yang W. H., Targ Y. S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method // Journal of materials processing technology. 1998. V. 84. N. 1—3. P. 122—129.
7. Taguchi G., Konishi S. Taguchi methods: Orthogonal arrays and linear graphs: tools for quality engineering. American Supplier Institute, 1987.
8. Калашников А. С. Технология изготовления зубчатых колес. М.: Машиностроение. 2004. 479 с.
9. Анисимов Р. В., Тарапанов А. С. Силы резания при зубодоблении колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 5. С. 86—93.

УДК 621.43173.068

С. В. ГАЙСИН, В. Ф. КУТЕНЁВ, д-р техн. наук (ГНЦ "НАМИ"), e-mail: vakutenev@nami.ru

## Влияние конструкции автомобиля на выбросы твердых частиц в окружающую среду крупных городов

Проанализированы выбросы твердых частиц от эксплуатации разных транспортных средств. Исследованы выбросы, вызванные изнашиванием шин и дорожного полотна, а также твердых частиц в отработавших газах легковых и грузовых автомобилей, работающих в городском режиме.

**Ключевые слова:** автотранспортное средство, выбросы, вредные вещества, твердые частицы, канцерогенные вещества, экологическая безопасность.

The emissions of solid particles from the operation of various vehicles are analyzed. The emissions caused by the wear of tires and roadbed, as well as solid particles in the exhaust gases of cars and trucks operating in urban mode, are investigated.

**Keywords:** motor vehicle, emissions, harmful substances, solid particles, carcinogens, environmental safety.

Автотранспортные средства (АТС), предназначенные для быстрого и комфортабельного передвижения людей, транспортировки грузов и решения других технологических задач, при эксплуатации загрязняют окружающую среду, так как в отработавших газах (ОГ) содержится много вредных веществ (ВВ). По этой причине в 2012 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) предложила запретить использование в европейских городах автомобили, оснащенные дизелями [1].

По оценке ВОЗ, именно загрязнение воздуха является причиной преждевременной смерти трех миллионов человек в год. За последние 40 лет в Европе и США значительно увеличилось число онкологических больных, особенно больных раком легких [2]. Однако утверждать, что основной причиной образования смога в городах являются автомобили с дизелями, преждевременно. Сегодня производители автомобилей добились больших успехов в снижении выбросов ВВ и твердых частиц (ТЧ) при работе автомобилей.

На рис. 1 приведены результаты по снижению суммарных выбросов ВВ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$ ) и ТЧ, содержащихся в ОГ, а также рост парка АТС в России [3, 4].

Значительное снижение выбросов ВВ связано с оснащением автотранспорта антиоксидантными системами и системами нейтрализации ОГ, которое обусловлено введением в 2000 г. требований ЕВРО. При этом предполагалось, что к 2018 г. содержание ВВ снизится в 5 раз (см. рис. 1). Однако из-за медленного обновления автотранспортного парка выбросы снизились только в 2 раза.

Главной причиной образования смога является загрязнение воздуха ТЧ, образующимися в результате изнашивания шин и дорожного полотна [3–5], в состав которых входят опасные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), являющиеся канцерогенными веществами, которые вызывают онкологические заболевания [4, 5].

В 2014 г. на 161-й сессии Всемирного Форума (WP-29) по разработке международных Правил ООН "Требования к конструкции транспортных средств" на основании исследований [5–7] был представлен доклад, в котором отмечалось, что по нормам ООН для легковых автомобилей выбросы ТЧ, находящихся в ОГ, не должны превышать 0,005 г на километр пробега АТС. Расчеты показали, что выбросы от изнашивания шин составля-

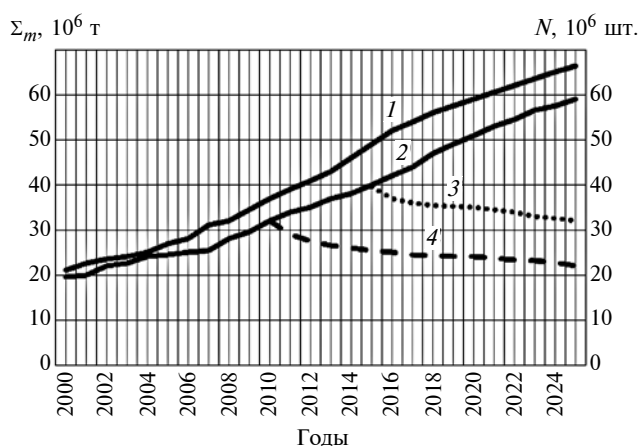


Рис. 1. Рост числа  $N$  автомобилей в России за 2000–2025 гг. (1) и изменение суммарной массы  $\Sigma m$  выбрасываемых ВВ за год с ОГ при эксплуатации автомобилей, соответствующих нормам Евро-0 (2), при обновлении парка автомобилей с Евро-1 до Евро-4 через 15 лет (3) и через 10 лет (4)

ют 0,132 г/км, от работы тормозных механизмов — 0,0192 г/км. Для грузовых автомобилей выбросы ТЧ с ОГ не должны превышать 0,15÷0,25 г/км, а от изнашивания шин они составляют 1,5 г/км, от работы тормозных механизмов — 0,168 г/км. Таким образом, загрязнение окружающей среды ТЧ в результате изнашивания шин легковых автомобилей в 25 раз превышает допустимые нормы на ТЧ в ОГ, а ТЧ от изнашивания шин грузовых автомобилей превышают в 150 раз [7]. Особенно вредными являются мелкие частицы размером от 0,3 до 1 мкм [7].

Естественно, что на доклад российских специалистов о вреде и количестве ТЧ, образующихся от изнашивания шин и дорожного покрытия, отрицательно отреагировали представители Европейской ассоциации производителей шин (ETRMA). Они представили документ от 2010 г. [8], в котором размеры частиц от изнашивания шин и дорожного полотна составляли 4÷350 мкм, т. е. средняя масса ТЧ находилась в интервале 80÷100 мкм, следовательно, данные частицы должны оседать на дороге и прилегающей к ней зоне.

В работе [9] данные о размерах ТЧ совпадают с данными российских исследований, т. е. основная масса ТЧ, собранных из-под ведущих колес автомобилей, составляет 0,3÷1 мкм.

В последние годы экологи Европы обеспокоены концентрацией канцерогенных веществ и летучих N-нитрозаминов в воздухе и призывают принять неотложные меры для решения этой проблемы. Однако крупным корпорациям по производству шин это невыгодно, они скрывают данные об опасности и содержании в воздухе ТЧ от изнашивания шин, однако под давлением общественности вынуждены вести работы по замене нефтепродуктов на безопасные материалы.

В работе, на которую ссылается ETRMA, указывается, что до настоящего времени нельзя было в условиях городского режима вождения достоверно собрать данные по частицам, образующимся от изнашивания шин [8]. В 2017 г. российские специалисты доказали, что в воздухе над дорожным покрытием всегда существует значительное количество ТЧ размерами до 10 мкм [10] (табл. 1).

Таблица 1  
Содержание ТЧ в воздухе в зависимости от их размера,  
 $10^6$  шт/м<sup>2</sup>

<i>d</i> , мкм	Над дорожным полотном	При движении автомобиля в городе
0,3	44	12
0,5	40	8
1	100	7
5	21	3
10	12	1

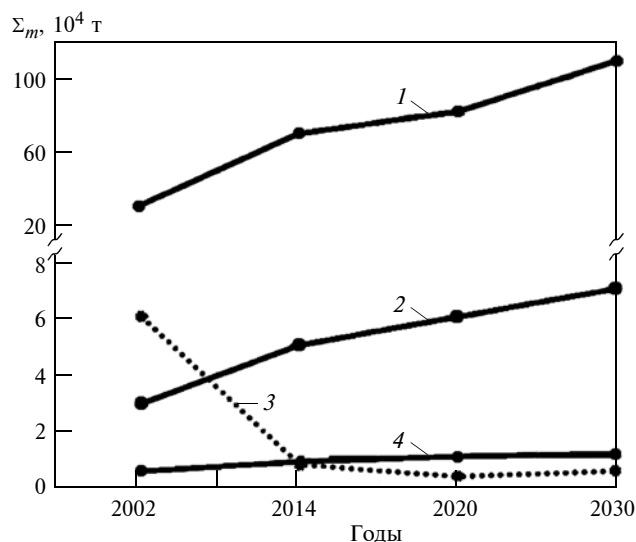


Рис. 2. Реальные и прогнозируемые суммарные массы  $\Sigma m$  ТЧ за год в г. Москве от изнашивания дорожного полотна (1), шин (2), тормозных механизмов (4) и нормы ООН на выбросы с ОГ (3)

Результаты исследований выбросов ТЧ менее 10 мкм при эксплуатации автомобиля в городском режиме показали, что выбросы ТЧ от изнашивания шин и дорожного полотна могут в 10 раз превышать фоновые значения, при этом 97 % состоит из ТЧ размером 0,3÷5 мкм, следовательно, позиция ETRMA в оценке размеров ТЧ ошибочная [10].

Специалисты НАМИ собрали данные и сделали перспективные расчеты по выбросам ТЧ размерами менее 10 мкм при эксплуатации автопарка г. Москвы (рис. 2). На сегодня выбросы ТЧ от изнашивания шин в 24 раза превышают нормативы ООН на выбросы ТЧ с ОГ, а выбросы от тормозных систем превышают в 4 раза. При этом выбросы ТЧ от изнашивания дорожного полотна в 200 раз превышают нормативы ООН на выбросы ТЧ с ОГ [11]. К тому же в асфальтовой части дорожного полотна содержится намного больше канцерогенных веществ, чем в шинах [8].

Для повышения экологической безопасности производители шин снижают выбросы ТЧ в окружающую среду, уменьшая коэффициент сопротивления качению [11]. Для этого используют сложный состав углеводородов, содержащихся в сырой нефти, которые составляют 30÷40 % резиновой смеси, остальное — каучук (натуральный или синтетический) и углеродная сажа [12]. Сегодня производители шин стараются использовать доступное и возобновляемое сырье, например микроцеллюлозу с минеральными наполнителями. Для получения синтетического каучука применяют микроорганизмы. Разработчиками экологически безопасных шин запатентован наполнитель на основе кукурузного крахмала [12].

Два гиганта шинной индустрии — Goodyear и Dunlop с помощью специалистов из DuPont Bio-

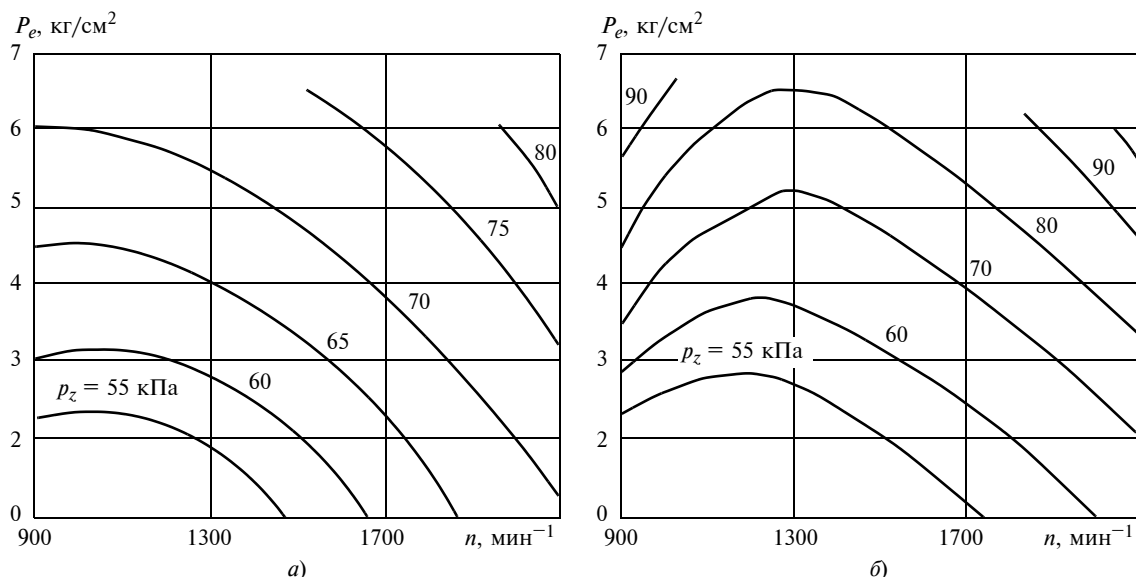


Рис. 3. Диаграммы разных значений давления  $p_z$  сгорания при работе двигателя ЯМЗ-238 М на дизельном топливе (а) и бензине А-72 (б) при определенных сочетаниях частоты  $n$  вращения коленчатого вала и нагрузки  $P_e$

sciences создали масляную смесь Biolsoprene, которую применяют для синтеза синтетического каучука, что позволит в течение десяти лет отказаться от использования нефтепродуктов и природного каучука [12].

Концерн Pirelli разработал шины Cinturato P7, которые позволяют снизить расход топлива, выбросы  $\text{CO}_2$  на 4 %, коэффициент сопротивления качению на 20 % и уровень шума на 30 % [13].

К экологически чистым шинам можно отнести шины Michelin Energy Saver, Goodyear DuraGrip и Continental ContiEcoContact.

Протектор шин фирмы Накка изготовлен из резиновой смеси Накка Green Silica с добавками масла финской сосны, которая улучшает сцепление шины с мокрым дорожным покрытием и снижает коэффициент трения, что повышает износостойкость шин [14].

Компания Continental работает над созданием технологий, позволяющих в производстве шин заменить сырую нефть рапсовым маслом. Однако пока не удастся при замене сырой нефти сохранить все положительные свойства компонентов.

Фирма Bridgestone повышает ходимость шин конструктивными решениями, изменяя брекеры,

каркасы, плечевые зоны и используя особый рисунок протектора.

Однако исследования показывают, что важнейшими проблемами являются снижение выбросов ТЧ, образующихся при изнашивании шин и дорожного полотна, и содержания в них канцерогенных веществ.

Кроме того, возникает вопрос — почему международными Правилами ООН предписываются разные нормы на выброс ТЧ для бензиновых двигателей и дизелей?

Проанализируем образование ТЧ и их количество в ОГ бензиновых двигателей и дизелей. Неужели процесс сгорания в дизеле хуже, чем в бензиновом двигателе? Тогда почему дизели по расходу топлива предпочтительнее? Возможно, рабочий процесс дизелей эффективнее.

В табл. 2 приведены данные по содержанию углерода (С) и водорода (Н) в моторных топливах [15]. Содержащиеся в нефти углеводороды имеют разную молекулярную массу и температуру кипения. При нагревании нефти сначала испаряются низкомолекулярные углеводороды. По мере повышения температуры испаряются углеводороды с большей молекулярной массой. При этом в неис-

Таблица 2

Эксплуатационные показатели моторных топлив

Топливо	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплота сгорания (низшая), МДж/кг	Содержание, мас. %	
			С	Н
Автомобильный бензин	710÷760	43,0÷45,0	85,5÷86,0	14,4÷14,0
Дизельное топливо	830÷860	42,5÷42,7	85,8÷87,0	14,0÷12,8

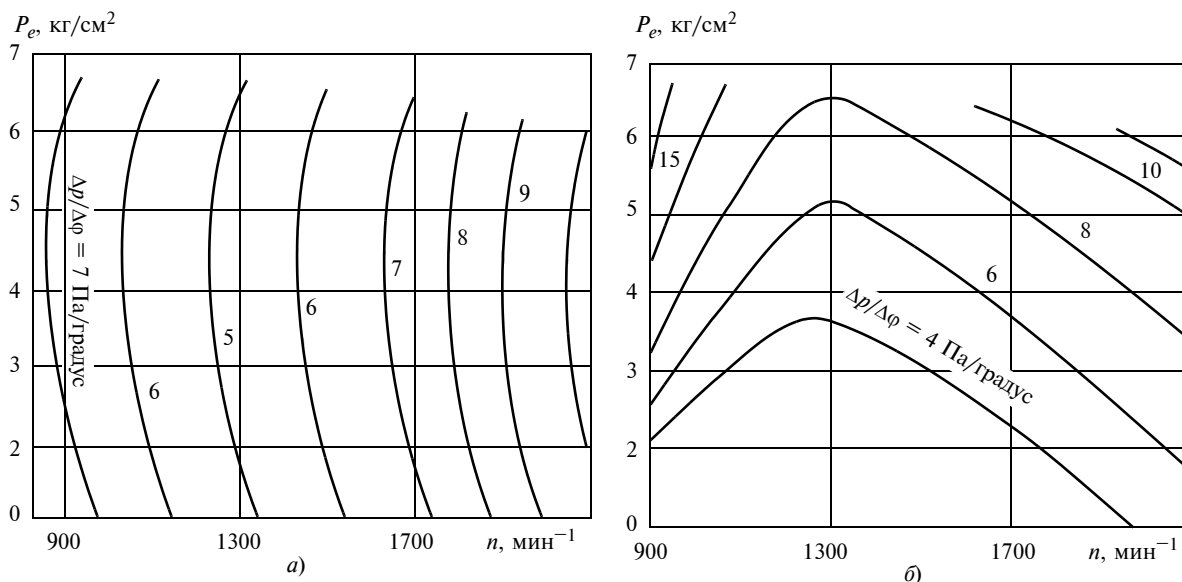


Рис. 4. Диаграммы разных значений скорости  $\Delta p/\Delta\varphi$  нарастания давления сгорания при работе двигателя ЯМЗ-238 М на дизельном топливе (а) и бензине А-72 (б) при определенных сочетаниях частоты  $n$  вращения коленчатого вала и нагрузки  $P_e$

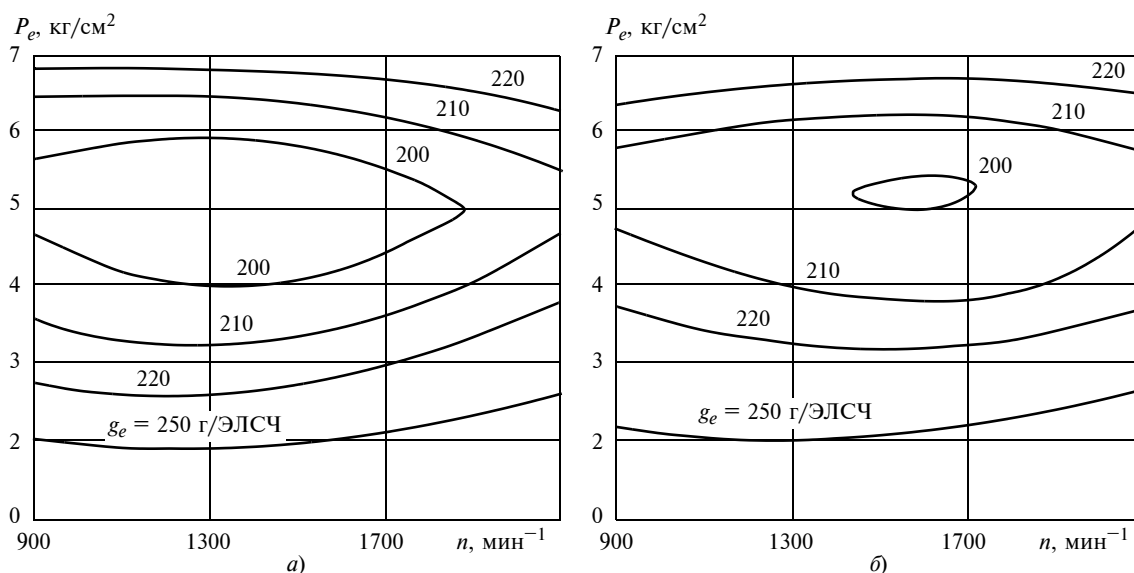


Рис. 5. Диаграммы разных значений удельного расход  $g_e$  топлива при работе двигателя ЯМЗ-238 М на дизельном топливе (а) и бензине А-72 (б) при определенных сочетаниях частоты  $n$  вращения коленчатого вала и нагрузки  $P_e$

парившейся части нефти концентрируются высокомолекулярные углеводороды и смолисто-асфальтовые вещества, которые и используют при изготовлении асфальто-бетонного покрытия дорожного полотна.

Прямогонные дизельные топлива примерно на 95 % состоят из углеводородов перерабатываемой нефти с температурами кипения, соответствующими температуре кипения дизельного топлива, т. е. 150÷400 °С. Это насыщенные углеводороды с числом углеродных атомов от 10 до 25 [15].

Итак, бензиновое топливо состоит из углеводородов, содержащих углероды от  $C_6$  до  $C_{10}$ , а дизельное топливо содержит углероды от  $C_{10}$  до  $C_{25}$ , т. е.

в дизельном топливе углерода в 2—2,5 раз больше, чем в бензиновом топливе, что позволяет частично ответить на поставленный вопрос. Если частично перевести дизели на топливо для бензиновых двигателей (соотношение 1:1), это существенно уменьшит выбросы ТЧ с ОГ.

На Ярославском моторном заводе в 1959—1961 гг. пытались перевести дизели на смешанное топливо и работали над созданием многотопливных модификаций двигателей ЯМЗ-238 [16].

На рис. 3—5 приведены показатели процесса сгорания при работе на дизельном топливе и бензине.

Результаты исследований, проведенных на Ярославском моторном заводе, показали, что четырех-

Выбросы ВВ и ТЧ при эксплуатации разных ТС, г/км

ТС	СО	NO <sub>x</sub>	СН	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	ТЧ ОГ	ТЧ Ш	ТЧ ДП	ТЧ ТН
Автобус	4,80	24,00	0,14	1,7	1314	0,50	1,4	12	0,20
Троллейбус	0,60	1,31	0	0	912	0,25	1,4	12	0,16
Трамвай	0	0	0	0	912	0	0	0	0,13

тактные двигатели ЯМЗ-236-238-240 могут работать на автомобильном бензине А-72 и на дизельном топливе без переналадки топливной аппаратуры практически с одинаковой мощностью и при одинаковом расходе топлива, что ставит их в один ряд с лучшими зарубежными многотопливными двигателями.

Есть топливо расширенного фракционного состава (РФС), которое готовится смешиванием дизельного топлива с 10÷30 % прямогонных бензиновых фракций, а также арктическое дизельное топливо. Поэтому остается только создать модификацию многотопливных дизелей для использования их на автомобилях, эксплуатируемых в городских условиях.

Остается вопрос — какое транспортное средство эффективнее использовать в городских условиях с позиций экологии и экономии?

Ответ можно получить из анализа данных табл. 3, в которой приведены результаты исследований [10, 11] выбросов ТЧ от изнашивания шин (ТЧ Ш), тормозных накладок (ТЧ ТН) и дорожного полотна (ТЧ ДП), а также выбросов оксида углерода (СО), оксидов азота (NO<sub>x</sub>), углеводов (СН), оксида серы (SO<sub>2</sub>) и диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) с ОГ.

Для улучшения экологического состояния городов необходимо снижать количество гудрона при изготовлении дорожного полотна и использовать такие экологически чистые виды транспорта, как трамвай. При эксплуатации данное ТС создает выбросы ТЧ только при торможении и в 10—15 раз экономичнее автобуса и троллейбуса, так как коэффициент сопротивления качения металлического колеса по рельсам составляет 0,001, а коэффициент сопротивления качения шины по дорожному полотну составляет 0,010÷0,015.

Чтобы снизить выбросы ТЧ от изнашивания дорожного полотна, надо отказаться от использования отходов нефтеперерабатывающей отрасли, т. е. от высокомолекулярных смолисто-асфальтовых веществ (мазута), и перейти на бетонные покрытия дорожных магистралей и пешеходных тротуаров. Это позволит повысить до 21 % содержание кислорода в воздушной среде городов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Вестник ЕЭК ООН. Женева. 2012. № 9.
2. Качество атмосферного воздуха и здоровье // Инф. бюл. ВОЗ. 2014. № 313.
3. Азаров В. К., Кутенев В. Ф., Сайкин А. М. Новые проблемы создания экологически чистого автомобиля // Автомобильная промышленность. 2013. № 10. С. 5—7.
4. Азаров В. К., Кутенев В. Ф. О показателе экологической опасности автотранспортных средств // Тр. НАМИ. 2014. № 257. С. 31—40.
5. Хесин А. И., Скудатин М. Е., Ушмодин В. Н. Канцерогенная опасность автомобильных шин // Национальная безопасность и геополитика России. 2003. № 10, 11 (51, 52). С. 51, 52.
6. Азаров В. К., Васильев А. В., Кутенев В. Ф. Современные экологические проблемы грузовых автомобилей и автобусов // Тр. НАМИ. 2014. № 258. С. 94—101.
7. Азаров В. К., Васильев А. В., Гайсин С. В. Причины возникновения смога в крупных городах // Вестник машиностроения. 2016. № 7. С. 86—88.
8. Effects of Intratracheal Instillation of Tire and Road Wear Particles and Tread Particles on Inflammation and Cytotoxicity in Rat Lung: A Comparative Toxicity Study / M. L. Kreider, J. M. Panko, B. L. McAttee et al. // Sci Total Environ. 2009. N. 408 (2). С. 652—659.
9. Нцахристос Л., Боуглер П. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов. SOT, 2009.
10. Азаров В. К., Гайсин С. В., Кутенев В. Ф. К вопросу об экологически чистом городском транспорте // ААИ. 2016. № 2 (97). С. 36—41.
11. Азаров В. К., Кутенев В. Ф., Петрушов В. А. Экологические проблемы автомобильного транспорта и риски в экономике страны // Инвестиции в России. 2018. № 1 (276). С. 11—17.
12. autexpert.ru>ekologicheskii-chistyye-shingi.
13. whed-info.ru>novye-tehnologie-shin-htnnl.
14. autobot>artiche/shiny///maslam-finsky.sosni.ntml.
15. Васильева Л. С. Краткий справочник по автомобильным эксплуатационным материалам. М.: Транспорт, 1992. С. 3—9.
16. Кутенев В. Ф. Исследование работы автотракторного двигателя на дизельном топливе и на бензине. Дипломная работа. 1961. Ярославль: Ярославский технологический институт МВ и ССО РСФСР.