

# ИНЖЕНЕРНЫЙ ЖУРНАЛ СПРАВОЧНИК

1 (142)  
2009

С приложением

Научно-технический и производственный журнал

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

Издается с января 1997 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Общетехническая информация</b>	
Правила выполнения эксплуатационных документов по ГОСТ 2.610–2006. <i>Продолжение</i> .....	3
<b>Современные технологии</b>	
Ашихмин В.Н., Закураев В.В. Совершенствование методики размерного анализа технологических процессов .....	12
Дерябин В.А., Казак К.В., Евсеева М.В. Промышленно развитые способы нанесения покрытий (обзор) .....	16
Саламадра Б.Л., Тывес Л.И., Саламадра К.Б. Новые технические решения в построении упаковочных автоматов типа Form – Film – Seal (FFS) .....	22
<b>Конструирование, расчеты</b>	
Крайнев А.Ф. Учимся конструировать. Мельницы и дробилки (в историческом и логическом развитии) (вкладка)	
<b>Технологическая оснастка</b>	
Мясников Ю.И. Модульные перенастраиваемые станочные приспособления в современном производстве .....	28
<b>Металлорежущие станки и инструменты</b>	
Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением по ГОСТ 27843–2006 (ИСО 230-2:1997) .....	32
<b>Экономика</b>	
Линдстрем К.Н. О проблемах модернизации и реконструкции предприятий машиностроения .....	39
Камакин В.А. Методологические основы безопасности информационных потоков в условиях автоматизации процессов управления объектами производства .....	41
<b>Справочник конструктора-машиностроителя</b>	
Бандажи черновые для локомотивов железных дорог широкой колес. Типы и размеры по ГОСТ Р 52366–2005* .....	46
<b>Разная информация</b>	
Грубый С.В., Шачнев С.Ю. Оптимизация режимных параметров обработки шар-баллонов на токарных операциях .....	49
Галиев Р.Ф., Жебышев Д.А., Шмырков О.В. Исследование кинетики растворения кислорода воздуха в воде в процессе его диспергирования с помощью волновых устройств .....	56
Указатель статей, опубликованных в 2008 г. ....	60

### Внимание!

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

Подписчики журнала имеют возможность получить бесплатную консультацию ведущих ученых и специалистов Международного союза машиностроителей по интересующим проблемам.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Справочник. Инженерный журнал", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

**Председатель редакционного совета**  
академик РАН, д-р техн. наук  
Р.Ф. ГАНИЕВ

**Заместитель председателя редакционного совета**  
д-р техн. наук  
А.Г. СУСЛОВ

**Главный редактор**  
И.Н. ЖЕСТКОВА

**Заместитель главного редактора**  
А.А. КУЛИКОВА

**Редакционный совет:**  
И.И. АРТЕМОВ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ  
А.И. БЕЛЯКОВ  
А.И. БОЛДЫРЕВ  
Р.Я. ВАКУЛЕНКО  
С.А. ВАСИИ  
В.А. ГОЛЕНКОВ  
О.А. ГОРЛЕНКО  
С.И. ГРИГОРЬЕВ  
М.А. ЕВДОКИМОВ  
А.А. ЖУКОВ  
В.Л. ЗАКОВОРОТНЫЙ  
Ю.М. ЗУБАРЕВ  
С.В. КИРСАНОВ  
А.Ю. КОНЫКОВ  
А.Н. КОРОТКОВ  
А.Ф. КРАЙНЕВ  
В.Д. КУХАРЬ  
В.А. ДАШКО  
О.П. ДЕЛИКОВ  
В.Ф. ЛУКЬЯНОВ  
В.Ф. МАКАРОВ  
В.Г. МАЛИНИН  
С.В. МИЩЕНКО  
Ю.В. ПАНФИЛОВ  
В.П. ПУЧКОВ  
В.П. СМОЛЕНЦЕВ  
Ю.С. СТЕПАНОВ  
А.Г. СМЕРТЛАДЗЕ  
В.М. ТРУХАНОВ  
В.М. ШАРИПОВ

**Редакция:**  
С.М. МАКЕЕВА  
А.А. КУЛИКОВА  
Н.М. ШИБАНОВА

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 014670 от 25.12.1997 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогам "Роспечать" 72428, "Пресса России" 41299, "Почта России" 60255) или непосредственно в отделе продаж, маркетинга и рекламы.

Тел.: (499) 269-66-00  
269-62-98

Тел. редакции:  
(499) 269-54-95  
269-49-98  
Факс: (499) 269-40-97  
268-85-26

WWW.Mashin.ru  
E-mail: handbook@mashin.ru

# AN ENGINEERING JOURNAL Handbook

1 (142)  
2009

With supplement

Scientific, technical and production monthly journal

Publishes from January, 1997

## CONTENTS

<b>General Technical Information</b>	
Rules for making exploitative documents to GOST 2.610-2006 .....	3
<b>Up-to-date Technologies</b>	
Ashichmin V.N., Zakuraev V.V. Advanced method of the dimensional analysis for technological processes .....	12
Deryabin V.A., Kazak K.V., Yevseyeva M.V. Industrially developed coating forming methods (review) .....	16
Salamandra B.Z., Salamandra K.B., Tyves L.I. New technical decisions in construction of automatic machines of "Form - Fill - Seal" (FFS) type .....	22
<b>Constructing, calculations</b>	
Kraïnev A.Ph. We study to construct (supplementary sheet)	
<b>Technological rigging</b>	
Myasnikov Yu.I. Modular reprogrammable machining accessories in modern production .....	28
<b>Metal-cutting machines and tools</b>	
Test of machine tools. Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes to GOST 27843-2006 (ISO 230-2:1997) .....	32
<b>Economics</b>	
Lindstrom K.N. On the problems of modernization and reconstruction of machine building enterprises .....	39
Kamakin V.A. The methodological principles of the information streams defence in the conditions of automatization of manufacture unit production process .....	41
<b>The handbook of Machinery Constructor</b>	
Rough tyres for locomotive of broad gauge railways. Types and dimensions to GOST R 52366-2005 .....	46
<b>Different information</b>	
Grubiy S.V., Shachnev S.U. Optimization of paramets of metall cutting processes for turning sphere .....	49
Ganiev R.F., Zhebynev D.A., Shmircov O.V. Research dissolution kinetics of oxides of air in water in process of its dispergation with the help of wave devices .....	55
The index of the articles published in 2008 .....	60

President of Editorial advisory:  
Academicians of RAS,  
Dr. of Eng. Sci.  
R.F. GANIEV

Chairman Assistant  
Dr. of Eng. Sci.  
A.G. SUSLOV

Editor-in-Chief  
I.N. ZHESTKOVA  
Editorial Assistant

A.A. KULIKOVA

Editorial council:  
I.I. ARTEMOV  
V.F. BEZVATYCHON  
A.I. BELIKOV  
A.I. BOLDYREV  
R.Ye. VAKULENKO  
S.A. YASIN  
V.A. GOLENKOV  
D.A. GOLENKOV  
S.N. GREGORIEV  
M.A. POGORELOV  
A.A. ZHIGALOV  
V.I. ZAKHAROVICH  
Y.M. ZUBAREV  
S.V. KIKELANDY  
A.Ye. KONKON  
A.N. KOROTKOV  
A.Ph. KRATNEV  
V.D. KUSHAR  
V.A. LASHKO  
O.P. LELILOV  
V.F. LEXANDY  
V.F. MAKAROV  
V.G. MALINOV  
S.V. MISHENKO  
Ye.V. PANFILOV  
V.F. PUCHKOV  
V.F. SMOLENTSEV  
Ye. S. STEPANOV  
A.G. SHIRTLANDZE  
V.M. TELIHANOV  
V.M. SHARIPOV

Editor:  
S.M. MAKIEVA  
A.A. KULIKOVA  
N.M. SHIRANOVA

The journal is registered  
in State Committee of Russian Federation  
on printing. Registration certificate  
N 034670 at 25.12.1997.

The journal is being distributed  
according to a subscription,  
which is available  
in any post office  
(indexes in the catalogue  
"Rosspechat" - 72428,  
Joint Catalogue  
"Pressa Rossa" - 41299,  
by the catalogue  
"Pochta Rossa" - 66255)  
or at the publishing house directly.

Tel: (499) 269-54-96  
269-49-99  
Tel./fax: (499) 269-65-26  
Fax: (499) 269-66-97  
E-mail: handbook@machinfo.ru

The Journal is among those approved by AAC RF for dissertation publication. Reprint, all types of copying and reproduction of the materials published in the journal "Handbook. An Engineering Journal" are allowed only with the permission from the editors and with the reference to the source of information. Advertisers are fully responsible for the content of the advertisements.

## Оптимизация режимных параметров обработки шар-баллонов на токарных операциях

*В статье приведено решение задачи повышения эффективности механической обработки за счет проведения структурно-параметрической оптимизации. Оптимизация проводилась на операциях точения деталей из титановых сплавов. Для решения задачи оптимизации использован метод штрафных функций.*

*Представлены полиномиальные модели функций стойкости и сил резания. Построены линии уровней стойкости.*

**Ключевые слова:** точение, титановые сплавы, штрафная функция, стойкость.

S.V. GRUBIY, S.U. SHACHNEV

## Optimization of parameters of metall cutting proucess for turting sphere

*The article examines how to enhance the efficiency of mechanical operations by means of structural – parametrical optimization.*

*A structural – parametrical optimization, based on penalty function method, has been used in titanium alloy turning. Polynomial function models of cutting and resistance forces are given in this article and resistance level data are drawn.*

**Key words:** optimization, turning, titanium alloy, penalty function, resistance.

Шар-баллоны относятся к ответственным изделиям ракетно-космической техники (РКТ) и предназначены для хранения на борту космических аппаратов различных газов, находящихся под высоким давлением. Конструктивно баллоны представляют собой тонкостенные сосуды в виде шара, диаметр которого для различных типоразмеров находится в пределах 340...480 мм. Механической обработке подвергаются оба полушария по наружной и внутренней поверхностями с последующей сваркой.

Шар-баллоны изготавливают из титановых сплавов марок ВТ3-1, ВТ6С, ВТ23, а также из коррозионно-стойкой стали. В общих технических требованиях к механической обработке шар-баллонов можно выделить требования по обеспечению: шероховатости поверхностей на сфере  $Ra\ 2,5$ , на штуцере  $Ra\ 1,25$ , отклонения от круглости  $0,02$  мм, допуск на толщину стенки  $\pm(0,1+0,2)$  мм.

Задача повышения эффективности обработки шар-баллонов поставлена в связи с высокой трудоемкостью используемых технологических процессов, характерной особенностью которых является последовательная пооперационная обработка на отдельных станках с применением напайных инструментов заводского изготовления. В качестве ме-

тодов и средств решения этой задачи принята структурно-параметрическая оптимизация, направленная на уменьшение числа установов (учитывая вес баллона до 16 кг), сокращение суммарного времени обработки на 40...50 %, применение режущих сборных инструментов, уменьшение числа специальных инструментов и приспособлений, возможность параллельной обработки на различных станках, в том числе на станках с ЧПУ.

Актуальность поставленной задачи вытекает из общей проблемы совершенствования механосборочного производства в связи с ростом объема изготовления изделий РКТ в краткосрочный период и долгосрочной перспективе. Проведенные исследования базируются на теоретических разработках кафедры "Инструментальная техника и технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также обобщают многолетний опыт механической обработки, накопленный на ЗАО "ЗЭМ" РКК "Энергия", в том числе при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов.

Титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам. Рекомендации по режимам резания для заготовок из этих сплавов представлены в справочной литературе в табличном виде. По-



мимо этого известны степенные формулы, по которым можно предварительно рассчитать скорость резания  $v$ , м/мин, составляющие силы резания  $P$ , Н. Например, для операции точения твердосплавными резцами в справочнике [1] приведены выражения:

$$\begin{aligned} v &= C_v K_v / (T^{0,35} s^{0,4} f^{0,2}), \\ P_c &= C_p v^{-0,1} s^{0,75} f^{0,9}, \end{aligned} \quad (1)$$

где постоянные выбирают для каждой марки сплава (для сплава марки ВТ6С  $C_v = 140$ ,  $C_p = 2000$ ).

К недостаткам формул (1) относится то, что они справедливы для конкретных условий соответствующих экспериментов. Учитывая большую трудоемкость проведения стойкостных и силовых опытов, наиболее эффективным путем является обобщение теоретических и расчетных зависимостей. В работе [2] приведены результаты теоретических исследований процесса изнашивания сборных твердосплавных резцов при обработке конструкционных сталей и сплавов, включая труднообрабатываемые. Разработана методика для анализа показателей процесса, сил резания, скорости изнашивания, величины износа и стойкости резцов в широком диапазоне изменения режимных параметров. Расчетная методика применима и для условий обработки титановых сплавов. Результирующие показатели предложено аппроксимировать полиномиальными моделями.

Полиномиальные модели обобщают большой класс уравнений, аппроксимирующих зависимости резания металлов, и которые можно представить общей математической зависимостью

$$y_i = \sum_{j=1}^k b_j f_j(x_i); \quad y = \mathbf{B}^T \mathbf{f}(x); \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

или в матричном виде  $\mathbf{X} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{Y}$ , где  $N$  – число исходных значений;  $k$  – число членов модели;  $x_i$  – матрица-столбец входных переменных;  $f_j(x_i)$  – функции-полиномы;  $b_j$  – коэффициенты;  $\mathbf{B}$  – матрица-столбец коэффициентов;  $\mathbf{X}$  – расширенная матрица условий (имеет  $N$ -строк и  $k$ -столбцов соответствующих функций-полиномов);  $\mathbf{Y}$  – матрица-столбец результирующих показателей. Для расчета коэффициентов уравнений (2) используют метод наименьших квадратов и метод стохастической аппроксимации. Последний метод имеет преимущества при обработке большого объема данных. Особенности вычислительных процедур при реализации этих методов изложены в работе [3].

Для функций стойкости твердосплавных резцов и сил резания предложено использовать полиномиальную модель, учитывающую влияние факторов

скорости, глубины, подачи, главного угла в плане и, включающую 21 член вида:

$$\begin{aligned} y &= \lg(T) = f(v, s, t, \varphi_0) = \\ &= \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{f}(x) = b_1 + b_2 v + b_3 s + \dots + b_{21} \varphi_0^2, \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y &= \lg(P_c) = f(v, s, t, \varphi_0) = \dots, \\ &\vdots \end{aligned}$$

где переменные присутствуют в кодированном (безразмерном) виде

$$\begin{aligned} \text{Cod}(x_n, x_{\max}, x_{\min}) &= \\ &= 2(\lg(x) - \lg(x_{\max})) / (\lg(x_{\max}) - \lg(x_{\min})) + 1. \end{aligned}$$

Здесь  $x_n$ ,  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – соответственно текущее, максимальное и минимальное значение фактора с размерностью в натуральных величинах. Тогда переменные в выражениях (3) можно представить соотношениями:

$$\begin{aligned} v &= \text{Cod}(v_n; 110; 20); \quad s = \text{Cod}(s_n; 0,5; 0,1); \\ t &= \text{Cod}(t_n; 4; 1); \quad \varphi_0 = \text{Cod}(\varphi_{0n}; 100; 10), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $v_n$ ,  $s_n$ ,  $t_n$ ,  $\varphi_{0n}$  – соответственно скорость, подача, глубина, угол в плане резца с размерностью м/мин, мм/об, мм, град.

Исходные базы данных по стойкости и силам резания сформированы на основании расчетов по методике, содержание которой изложено в работе [3]. Примеры расчетных зависимостей для резца с СМП формы WNMG-080404 из твердого сплава марки ВК6М с величиной износа по задней поверхности  $h_z = 0,6$  мм при обработке титанового сплава марки ВТ6С приведены на рис. 1–5.

На основании полученных расчетных зависимостей формируется база данных как текстовый файл, в каждой строке которого содержатся значения

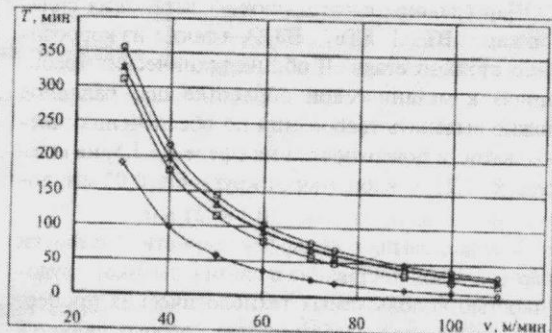


Рис. 1. Зависимость стойкости от различных углов  $\varphi$  в плане резца ( $t = 1$  мм;  $s = 0,2$  мм/об):

—◇— — 95°; —□— — 75°; —△— — 60°; —×— — 45°; —○— — 15°

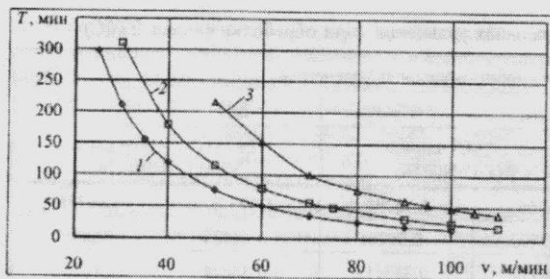


Рис. 2. Зависимость стойкости от скорости резания при различных значениях подачи ( $t = 1$  мм;  $\varphi_0 = 75^\circ$ ):  
1–3 – соответственно 0,3; 0,2; 0,1 мм/об

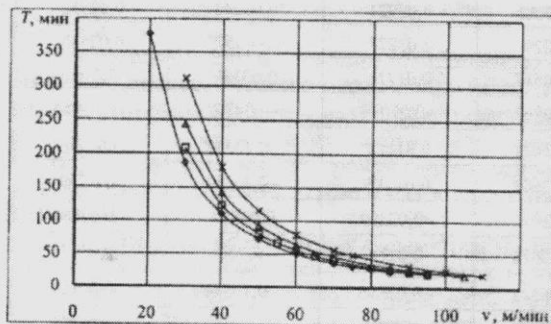


Рис. 3. Зависимость стойкости от скорости резания при различных значениях глубины резания ( $s = 0,2$  мм/об;  $\varphi_0 = 75^\circ$ ):  
◇ – 4 мм; □ – 3 мм; △ – 2 мм; × – 1 мм

скорости, подачи, глубины, угла в плане и соответствующего расчетного значения стойкости или силы резания. В табл. 1 показан фрагмент файла базы данных по стойкости инструмента для вышеотмеченных условий точения (всего 755 строк). Аналогичным образом рассчитываются и формируются файлы баз данных для других условий (форма СМП, марка твердого сплава, марка титанового сплава). Таким образом, каждый вариант условий имеет свой файл базы данных. Расчетом определяется матрица коэффициентов, которая в последующем используется для определения стойкости или силы резания в процедурах оптимизации. Таким образом, в рамках одной модели (3) получен ряд уравнений, каждое из которых представлено своим файлом коэффициентов.

В табл. 2 приведены коэффициенты полиномиальных уравнений для различных условий обработки (варьировалась форма СМП реза).

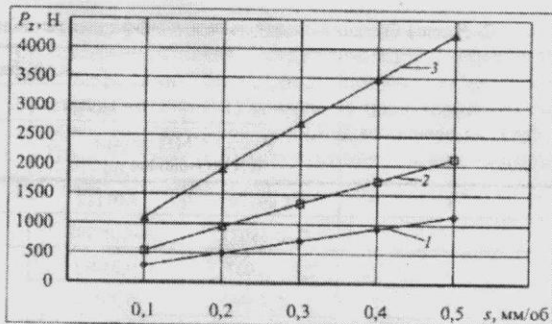


Рис. 4. Влияние подачи на главную составляющую  $P_z$  силы резания в зависимости от глубины резания ( $v = 70$  м/мин):  
1–4 – соответственно 1; 2; 4 мм

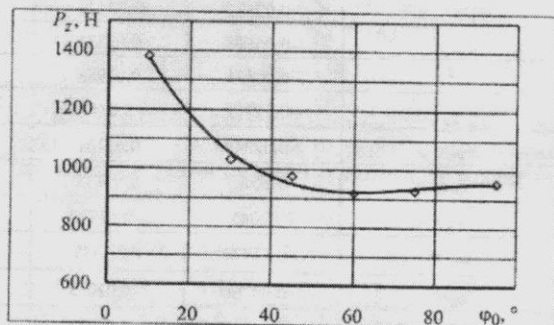


Рис. 5. Влияние угла в плане реза на главную составляющую  $P_z$  силы резания ( $v = 70$  м/мин;  $t = 2$  мм;  $s = 0,2$  мм/об)

Для анализа полученных уравнений построены линии уровня стойкости рис. 6. Следует отметить малые значения скорости резания при обработке титанового сплава. Так, для значения подачи  $s = 0,2$  мм/об стойкость  $T = 60$  мин соответствует скорости резания  $v = 39$  м/мин.

1. Исходная база данных по стойкости инструмента

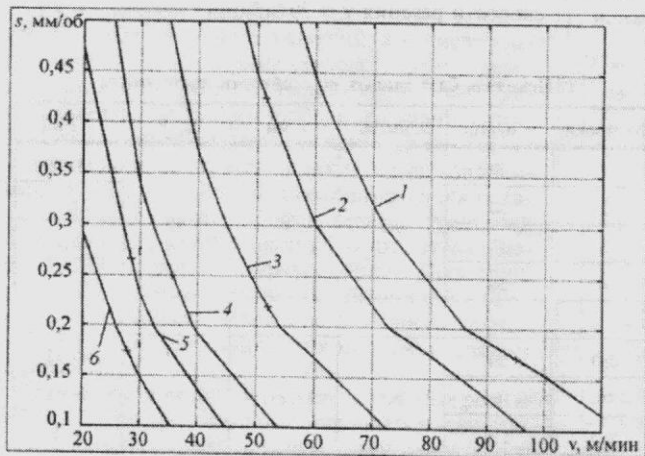
№ строки	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм	$\varphi_0$ , °	$T$ , мин
1	20	0,5	4	95	153,59
2	30				71,47
3	40				40,01
4	50				24,56
...	...	...	...	...	...
753	90	0,2	1	15	47,52
754	100				38,41
755	110				31,5



2. Члены функций-полиномов и коэффициенты полиномиальных уравнений (при обработке сплава ВТ6С)

Члены функций-полиномов	Коэффициенты полиномиальных уравнений					
	$y = \lg(T)$	$y = \lg(P_c)$	$y = \lg(f)$	$y = \lg(P_c)$	$y = \lg(T)$	$y = \lg(P_c)$
	Резец с СМП формы WNMG-080404 [6]		Резец с СМП формы CNMG-120408 [6]		Резец с СМП формы VBMT-160404 [6]	
1	1,69479	3,01113	1,70366	2,95289	1,30373	3,06355
v	-0,68081	-0,05998	-0,67506	-0,05786	-0,61335	-0,06576
s	-0,2037	0,31083	-0,20172	0,31311	-0,38824	0,31027
f	-0,12365	0,33114	-0,125	0,32771	-0,04896	0,31815
v·s	-0,00713	0,01663	-0,00772	0,02175	0,04407	0,02249
v·f	0,01888	-0,00022	0,01672	0,00057	0,08858	-0,00182
f·s	0,01731	-0,00341	0,01819	-0,00421	0,07135	-0,00402
v <sup>2</sup>	-0,02822	0,02429	-0,02006	0,02924	0,06243	0,02952
s <sup>2</sup>	-0,05666	0,03234	-0,029	0,03877	-0,00573	0,02484
f <sup>2</sup>	-0,00671	0,00988	-0,00517	0,01221	0,03589	0,0166
φ <sub>0</sub>	-0,12757	-0,08454	-0,05963	-0,07013	-0,34777	-0,05054
φ <sub>0</sub> ·v	-0,02343	0,01161	-0,03621	0,01113	-0,03542	0,00966
φ <sub>0</sub> ·s	-0,10082	0,02135	-0,07662	0,01512	-0,23884	0,01759
φ <sub>0</sub> ·f	0,02045	-0,01734	0,0265	-0,02299	0,05952	-0,02889
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup> ·v	-0,15474	-0,1548	-0,12678	-0,01743	-0,2384	-0,01674
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup> ·v <sup>2</sup>	-0,04766	-0,02052	-0,06542	-0,02326	-0,10269	-0,02162
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup> ·s	-0,11019	-0,04788	-0,07968	-0,0464	0,07388	-0,04292
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup> ·s <sup>2</sup>	0,05676	-0,03768	0,02446	-0,04562	-0,08838	-0,01772
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup> ·f	0,08967	-0,01792	0,08496	-0,01923	-0,06246	0,00136
φ <sub>0</sub> ·f <sup>2</sup>	-0,03338	-0,00491	-0,04196	-0,00501	-0,0823	-0,00371
φ <sub>0</sub> <sup>2</sup>	-0,13161	0,06812	-0,10876	0,06311	0,40225	-0,00778

Примечание. Резец из твердого сплава ВК6М, допустимый износ  $h_{z \max} = 0,3$  мм.



На основании проведенных экспериментальных исследований шероховатости обработанной поверхности, результаты которых приведены в работе [4], определено степенное уравнение, связывающее параметр шероховатости с режимными параметрами:

$$Ra = 18,85s^{1,076} v^{-0,15} \quad (5)$$

Полученные полиномиальные уравнения стойкости и силы резания (3) для резцов с СМП различных форм, а также степенное уравнение (5) для шероховатости

Рис. 6. Расчетные линии уровня стойкости ( $h_{z \max} = 0,3$  мм):  
1-6 – стойкость  $T$  соответственно 10; 15; 30; 60; 90; 150 мин



пенное уравнение параметра шероховатости (5), использованы для оптимизации режимных параметров на операциях наружного и внутреннего точения поверхностей шар-баллонов.

В основу оптимизации режимных параметров токарной обработки положен критерий, представленный соответствующим математическим уравнением в виде целевой функции. Тогда оптимальному решению соответствует минимум этой функции

$$y = f_0(X) \rightarrow \min, X \in \Omega, \quad (6)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (v, s)^T$  – вектор режимных переменных (параметров). Область  $\Omega$  является областью допустимых значений режимных переменных и задается системой технологических ограничений в виде уравнений, в общем случае неравенств и равенств.

Общая задача математического программирования с нелинейной целевой функцией (6) и (или) нелинейными ограничениями является оптимизационной задачей нелинейного программирования (НЛП), методы решения которой выбираются в зависимости от количества переменных и вида уравнений [5].

Для оптимизации режимных параметров на токарных операциях обработки шар-баллонов в качестве целевой функции принята себестоимость обработки деталей на операции, а в качестве технологических ограничений – заданная шероховатость обработанной поверхности, мощность станка, стойкость инструмента, предельно допустимые значения режимных параметров.

Для решения задачи НЛП был использован метод "штрафных" функций, когда решение находится как последовательность решений вспомогательной задачи безусловной минимизации составленных определенным образом функций. Общая схема построения расчетного алгоритма заключается в том, что минимизация  $f_0(X) \rightarrow \min, X \in \Omega$  эквивалента задаче безусловной минимизации суммы

$$f_0(X) + \delta(X) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $\delta(X)$  – индикаторная функция:

$$\delta(X) = \begin{cases} 0, & X \in \Omega \\ +\infty & X \notin \Omega \end{cases} \quad (8)$$

Когда множество  $\Omega$  задано с помощью непрерывных функций  $\varphi_i(X) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$ , можно построить последовательность "штрафов", сходящихся к индикаторной функции по области  $\Omega$  и неограниченно возрастающих при приближении к границе  $\Omega$ . В этом случае поиск минимума штрафной функции (7) нужно начинать с внутренней точки

области  $\Omega$ , т.е. когда ограничения выполнены как строгие неравенства. Тогда траектория минимизации "штрафной" функции не покинет области допустимых значений, отсюда и название – *метод внутренней штрафной функции*.

В алгоритмах оптимизации использована индикаторная функция вида:

$$\delta_k(X) = r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varphi_i(X)},$$

где  $r_k$  – параметр штрафа (коэффициент);  $k$  – номер итерации. Тогда общая задача НЛП эквивалентна задаче безусловной минимизации:

$$L(X, r_k) = f_0(X) + r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varphi_i(X)} \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\varphi_i(X) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m.$$

Для условий обработки шар-баллонов на токарных операциях в качестве режимных переменных приняты скорость резания и подача, и уравнение (9) примет вид:

$$L(v, s, r_k) = C(v, s) + r_k \left[ \frac{1}{Ra_z - Ra(v, s)} + \frac{1}{N_z - N(v, s)} + \frac{1}{T(v, s) - T_{\min}} + \frac{1}{v_{\max} - v} + \frac{1}{v - v_{\min}} + \frac{1}{s_{\max} - s} + \frac{1}{s - s_{\min}} \right] \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $C$  – переменная часть себестоимости обработки деталей на операции;  $Ra_z$  – заданная шероховатость;  $N_z$  – мощность станка;  $T_{\min}$  – минимальная стойкость инструмента. Предельные значения режимных переменных  $v_{\max}, v_{\min}, s_{\max}, s_{\min}$  соответствуют значениям в выражениях кодирования факторов (4).

Переменная часть себестоимости  $C(v, s)$  принята в виде

$$C = t_0 E + t_0 C_{\text{ст}} + t_0 (T_{\text{ст}} E + E_{\text{и}}) / T = C_{\text{ш}} + C_{\text{с}} + C_{\text{и}},$$

где  $t_0$  – основное технологическое время;  $E$  – стоимость минуты работы станка с учетом затрат на эксплуатацию и ремонт;  $C_{\text{ст}}$  – затраты на электроэнергию, приходящиеся на минуту резания;  $T_{\text{ст}}$  – время на замену инструмента после затупления и регулировку станка;  $E_{\text{и}}$  – расходы на инструмент за период стойкости  $T$ . Таким образом, можно выделить части себестоимости, приходящиеся на станок  $C_{\text{ст}}$ , электроэнергию  $C_{\text{с}}$  и инструмент  $C_{\text{и}}$ .



Для нахождения минимума функции (10) применен метод Ньютона, основанный на итерационном процессе вида

$$X_{k+1} = X_k - H_k^{-1}(L) \cdot \Delta_k(L), \quad (11)$$

где вектор переменных  $X$  изменяется на каждой итерации. В формуле (11)  $H^{-1}$  – обратная матрица Гессе функции (10);  $\Delta$  – матрица-столбец, содержащая соответствующие первые частные производные.

Матрица вторых производных функции – матрица Гессе – является квадратной симметричной  $H = \{a_{ij}\}$  и для двух переменных имеет вид:

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L(v, s)}{\partial v^2} & \frac{\partial^2 L(v, s)}{\partial v \cdot \partial s} \\ \frac{\partial^2 L(v, s)}{\partial s \cdot \partial v} & \frac{\partial^2 L(v, s)}{\partial s^2} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Если раскрыть операцию обращения, то выражение (11) в координатной форме примет вид:

$$\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ s_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_k \\ s_k \end{bmatrix} - \frac{1}{|H_k|} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \partial L / \partial v \\ \partial L / \partial s \end{bmatrix}_k, \quad (13)$$

где элементы матрицы, ее определитель и частные производные рассчитываются на каждой итерации.

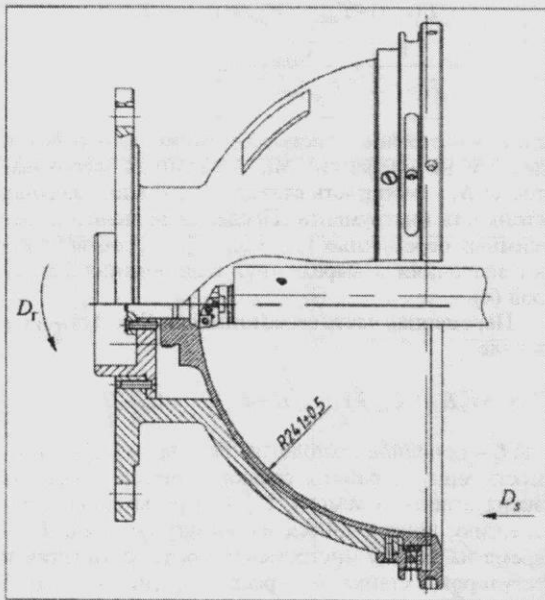


Рис. 7. Черновое и получистовое точение внутренней сферической поверхности полусферы

Оптимизация режимных параметров выполнена для операций точения внутренней и внешней сферической поверхностей полусферы из титанового сплава марки ВТ6С.

Схема обработки внутренней сферической поверхности показана на рис. 7.

На рис. 8 в виде графиков показана последовательность оптимизации режимных параметров при чистовом точении внутренней поверхности полусферы.

Оптимальные значения режимных параметров при точении внутренней поверхности полусферы приведены в табл. 3.

Оптимальные значения режимных параметров при точении наружной полусферы приведены в табл. 4.

На основании проведенного анализа номенклатуры шар-баллонов, свойств титановых сплавов, технических требований к операциям определены методы и средства повышения эффективности механической обработки шар-баллонов, основанные на структурно-параметрической оптимизации оборудования, режущего инструмента, средств технологического оснащения, режимов резания.

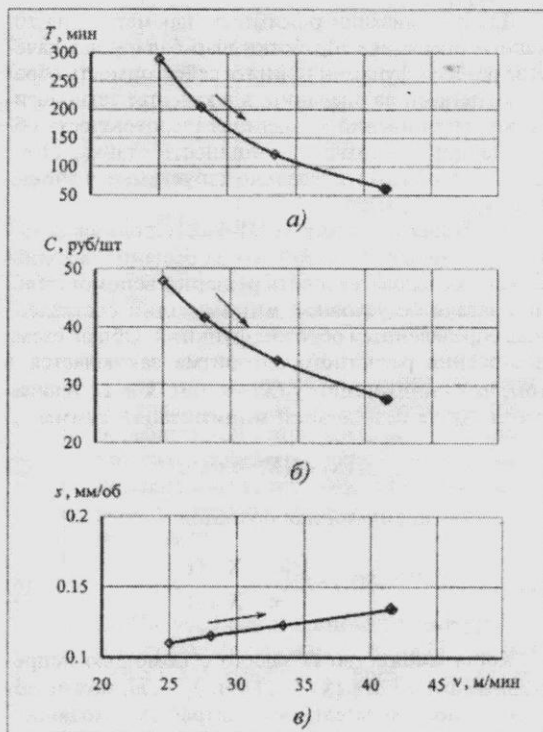


Рис. 8. Пример оптимизации режимных параметров на операции чистового точения внутренней полусферы: текущий угол в плане  $\varphi = 84^\circ$ , ограничения  $Ra = 2$  мкм,  $T_{\min} = 60$  мин



### 3. Оптимальные режимные параметры для операции точения внутренней полусферы

Переход	$t$ , мм	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	Основное время, мин
Черновое точение до диаметра 200 мм (1 проход), СМП формы CNMG-120408 [6]	4	38,0	0,17	43,0
Получистовое точение с диаметра 200 (4 прохода), СМП формы CNMG-120408 [6]	1	49,8	0,23	3,2
Чистовое точение (1 проход), СМП формы VBMT-160404 [6]	1	39,1	0,14	52,4

Примечание. Заданное значение стойкости  $T_{\text{min}} = 60$  мин в уравнении (10) обеспечивает обработку заготовки одним резцом.

Результатами проведенных исследований являются математически выраженные целевая функция и ограничения, использованные в предложенном алгоритме оптимизации параметров. Определены оптимальные значения режимных параметров на операциях точения внутренней и наружной сферических поверхностей, которые реализованы при обработке опытной партии шар-баллонов.

Развитием проведенных исследований будет являться обобщение их результатов и предложенного

### 4. Оптимальные режимные параметры для операции точения наружной полусферы

Переход	$t$ , мм	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	Основное время, мин
Получистовое точение (2 прохода)	2	41,2	0,23	61,4
Чистовое точение (1 проход)	1	48,6	0,17	33,0

Примечание. Резец с СМП формы WNMG-080404 [6].

методического подхода на технологические процессы механической обработки деталей РКТ различной номенклатуры и типоразмеров.

#### Библиографический список

1. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. М.: Машиностроение. 1986. 240 с.
2. Грубый С.В. Теоретические исследования процесса изнашивания лезвийных инструментов // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 44–50.
3. Грубый С.В. Многофакторные полиномиальные модели стойкости и скорости изнашивания инструментов // Технология металлов. 2006. № 11. С. 32–39.
4. Шачнев С.Ю. Обеспечение параметров шероховатости поверхности при обработке титановых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 5. С. 53–56.
5. Грубый С.В. Оптимизация режимов одноинструментной лезвийной обработки // СТИИ. 2008. № 1. С. 32–35; СТИИ. 2008. № 2. С. 24–26.
6. Каталог. Твердосплавный металлорежущий инструмент. Митсубиши карбид. 2007. 656 с.